

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

HYDRAULICKÝ MODELOVÝ VÝZKUM MĚRNÝCH CLON URČENÝCH PRO STANOVENÍ PRŮTOKU VODY V KRUHOVÝCH PROFILECH S VOLNOU HLADINOU

THE HYDRAULIC MODELLING RESEARCH OF SPECIFIC SHUTTER INTENDED FOR
DETERMINATION OF WATER FLOW IN CIRCULAR PROFILES WITH FREE SURFACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LENKA HEŘMANOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2012



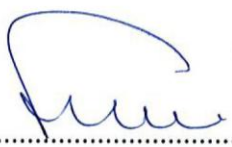
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb


ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Lenka Heřmanová
Název	Hydraulický modelový výzkum měrných clon určených pro stanovení průtoku vody v kruhových profilech s volnou hladinou
Vedoucí diplomové práce	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2011
Datum odevzdání diplomové práce	13. 1. 2012

V Brně dne 31. 3. 2011


.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

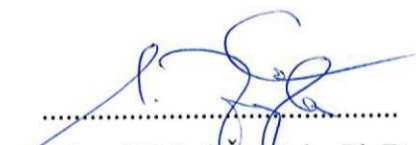
- [1] ČSN ISO 1438/1. Měření průtoků vody v otevřených korytech pomocí přelivů a Venturiho žlabů, Část 1 - Tenkostěnné přelivy, září 1997
- [2] ČSN ISO 9826. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech, Parshallovy žlaby a žlaby typu Saniiri, červen 1994
- [3] Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C. Hydraulika pro vodohospodářské stavby, 1. vydání, SNTL Praha, 1968

Zásady pro vypracování

Při měření na stokových sítích se v řadě případů používají speciální vestavbové prvky (měrné clony), které na principu Q/h charakteristiky umožňují přesné stanovení okamžitých průtoků. Diplomantka v měrné trati hydraulické laboratoře na kruhovém profilu DN 400 stanoví Q/h charakteristiky pro celkem 12 měrných clon. Ve smyslu zákonů modelové podobnosti určí Q/h charakteristiky i pro kruhové profily větších velikostí dosahujících průměrů až DN 1200. Vznikne tak kompletní řada Q/h charakteristik měrných clon pokrývajících jak požadované rozsahy v praxi se vyskytující průtoků, tak i průměrů potrubí prizmatických měrných tratí.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací
Práce bude obsahovat tabelární a grafické výstupy.



.....
Ing. Michal Žotůžela, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Hlavním výstupem této diplomové práce je sada Q/h charakteristik, která byla získána rozsáhlým hydraulickým modelovým výzkumem měrných clon, určených pro stanovení průtoku vody v kruhových profilech. Výsledné Q/h charakteristiky jsou funkcemi úhlů výřezu α a svislé odlehlosti vrcholu výřezu ode dna příslušné měrné clony. Součástí výstupu je přehled očekávaných hodnot nejistot při praktickém nasazení konkrétní clony v kanalizaci a zhodnocení jednotlivých vlivů podílejících se na celkové nejistotě stanovení průtoku. Z provedeného hydraulického modelového výzkumu je tedy možné stanovit Q/h charakteristiky i pro kruhové profily o větších průměrech a určit jejich nejistoty při užití konkrétní clony. Pro návrh typu a tvaru měrné clony u profilů o větším průměru je součástí výstupu i příloha pro rychlý návrh měrných clon.

Abstract

The main outcome of this Thesis is a set of Q / h characteristic that was obtained extensive hydraulic model research measuring plate designed for the determination of water flow in circular profiles. The final Q / h characteristic are functions of angle α and vertical cut remoteness of the top slot from the bottom of the measurement aperture. Part of the output is an overview of the expected values of uncertainties of measurement in practical use in a specific aperture in sewers and evaluation of impacts involved in determining the overall uncertainty of the flow. The performed hydraulic modeling research is therefore possible to determine Q / h and characteristics for circular sections of larger diameter and to determine their uncertainties when using specific plate. For the design and shape measuring plate of the profile with larger average output is part of a supplement for quick design of specific screens.

Klíčová slova

Q/h charakteristika, měrná clona, nejistota měření, ostrohranný přeliv, modelová podobnost

Key words

Q/h characteristics, measuring plate, uncertainty of measurement, thin-plate weir, model similarity

Bibliografická citace VŠKP

HEŘMANOVÁ, Lenka.

Hydraulický modelový výzkum měrných clon určených pro stanovení průtoku vody v kruhových profilech s volnou hladinou.

Brno, 2011.

100 s., 0 s. příl.

Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb.

Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za pomoc při tvorbě diplomové práce. Za jeho trpělivost a odborně cílené rady.

V Brně dne 13.1.2012

.....

podpis diplomanta

Obsah:

1	ÚVOD	10
2	OSTROHRANNÉ PŘELIVY.....	12
2.1	PŘELIVY BEZ BOČNÍ KONTRAKCE	13
2.1.1	Ostrohranný přeliv s obdélníkovým výřezem bez bočního zúžení	13
2.2	PŘELIVY S BOČNÍ KONTRAKCÍ	14
2.2.1	Ostrohranný přeliv s obdélníkovým výřezem s bočním zúžením	14
2.2.2	Ostrohranný přeliv s lichoběžníkovým výřezem.	16
2.2.3	Přeliv s trojúhelníkovým výřezem	17
3	CÍLE PRÁCE	22
4	POPIS LABORATOŘE, MĚŘICÍ TECHNIKY A MĚŘENÍ	25
5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	29
6	MĚRNÁ CLONA O VÝŘEZU 15°.....	32
6.1	MĚRNÁ CLONA 15°-0	33
6.2	MĚRNÁ CLONA 15° - 30.....	35
6.3	MĚRNÁ CLONA 15° - 60.....	37
6.4	MĚRNÁ CLONA 15° - 100.....	39
6.5	SJEDNOCENÍ DAT PRO MĚRNOU CLONU S VRCHOLOVÝM ÚHLEM VÝŘEZU 15°	40
6.6	POROVNÁNÍ Q/H CHARAKTERISTIKY MĚRNÉ CLONY O VÝŘEZU 15° SE VZTAHY UVEDENÝMI V ČSN EN ISO 1438-1	43
7	MĚRNÁ CLONA O VÝŘEZU 30°.....	44
7.1	MĚRNÁ CLONA 30° - 0.....	44
7.2	MĚRNÁ CLONA 30° - 30.....	46
7.3	MĚRNÁ CLONA 30° - 60.....	48
7.4	MĚRNÁ CLONA 30° - 100.....	50
7.5	SJEDNOCENÍ DAT PRO MĚRNOU CLONU S VRCHOLOVÝM ÚHLEM VÝŘEZU 30°	52
7.6	POROVNÁNÍ Q/H CHARAKTERISTIKY MĚRNÉ CLONY O VÝŘEZU 30° SE VZTAHY UVEDENÝMI V ČSN EN ISO 1438-1	54
8	MĚRNÁ CLONA O VÝŘEZU 60°.....	56
8.1	MĚRNÁ CLONA 60° - 0.....	56
8.2	MĚRNÁ CLONA 60° - 30.....	58
8.3	MĚRNÁ CLONA 60° - 60.....	60
8.4	MĚRNÁ CLONA 60° - 100.....	62
8.5	SJEDNOCENÍ DAT PRO MĚRNOU CLONU S VRCHOLOVÝM ÚHLEM VÝŘEZU 60°	64
8.6	POROVNÁNÍ Q/H CHARAKTERISTIKY MĚRNÉ CLONY O VÝŘEZU 60° SE VZTAHY UVEDENÝMI V ČSN EN ISO 1438-1	66
9	POROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH Q/H CHARAKTETISTIK JEDNOTLIVÝCH MĚRNÝCH CLON	67
9.1	PŘESNOST ODHADU REGRESNÍ FUNKCE	69
10	NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	72
10.1	OBECNÉ POJEDNÁNÍ O NEJISTOTĚ MĚŘENÍ	72

10.2	KONKRÉTNÍ APLIKACE NEJISTOTY MĚŘENÍ	73
10.3	VÝPOČET NEJISTOT PRO MĚRNÉ CLONY	74
11	MODELOVÁ PODOBNOST A JEJÍ UŽITÍ PŘI STANOVENÍ Q/H CHARAKTERISTIK PRO VĚTŠÍ PRŮMĚRY POTRUBÍ.....	83
12	POSTUP PŘI NÁVRHU KONKRÉTNÍ MĚRNÉ CLONY	85
12.1	VÝSLEDNÉ Q/H CHARAKTERISTIKY A JEJICH NEJISTOTY PRO VĚTŠÍ PRŮMĚRY POTRUBÍ	88
13	ZÁVĚR.....	97
14	POUŽITÁ LITERATURA	98

1 ÚVOD

Laboratoř vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb sídlící v budově B Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně zajišťuje pedagogickou a vědeckovýzkumnou činnost v oblasti hydraulického modelového výzkumu hydrotechnických staveb. V rámci předložené diplomové práce byl proveden hydraulický modelový výzkum řady speciálních měrných clon určených pro stanovení průtoku vody v kruhových profilech s volnou hladinou. Tyto měrné clony jsou v praxi využívány pro přesné jednorázové či trvalé měření průtoků v kanalizačních tratích provozovaných s volnou hladinou. Pro představu o aplikaci měrných clon v praxi, jsou na obrázku 1 uvedeny ukázky jejich tvarů a použití.



Obr. 1 Vlevo popřední pohled na měrnou clonu instalovanou v kanalizaci, vpravo ukázka různých velikostí měrných clon

V našem případě se konkrétně jednalo o přesné určení Q/h charakteristik pro 12 měrných clon umístěných v potrubí DN 400.

Dalším požadavkem bylo stanovit, na základě zákonů modelové podobnosti a dodržení mezních podmínek modelovatelnosti fyzikálních jevů, Q/h charakteristiky i pro kruhové profily větších velikostí dosahujících průměrů až DN 1500.

Tento výzkum byl proveden v hydraulické laboratoři v budově F areálu Fakulty stavební. Pro měření byl použit sklopný žlab o šířce 0,413 m, do něž bylo instalováno potrubí DN 400, do kterého byla postupně umisťována posuzovaná řada měrných clon.

Hlavním výstupem této práce je sada Q/h charakteristik, které jsou funkcemi úhlů výřezu α příslušné měrné clony. Součástí výstupu je i přehled očekávaných hodnot nejistot při praktickém nasazení konkrétní clony v in situ a příloha pro „rychlý“ návrh měrných clon.

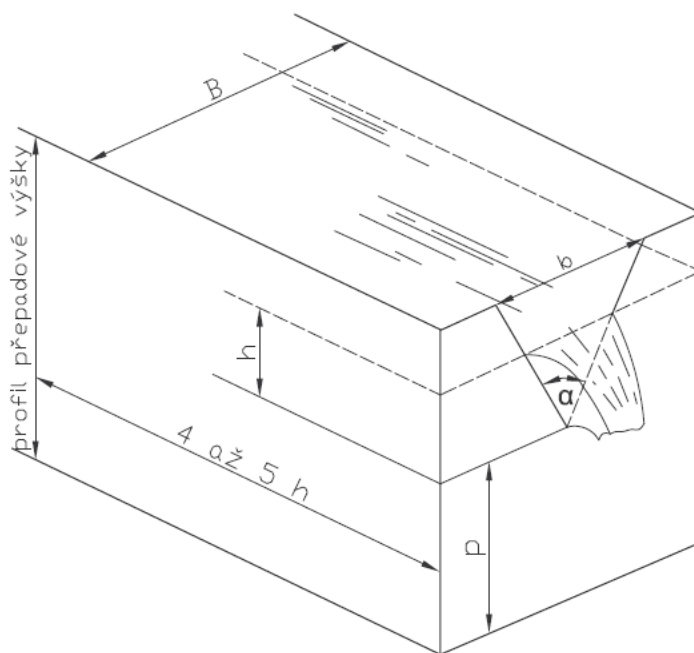
2 OSTROHRANNÉ PŘELIVY

Tato práce se zabývá určením Q/h charakteristik ostrohranných trojúhelníkových přelivů, jež mají být instalovány do potrubí s kruhovým průtočným průřezem. Takto instalované vzdouvací konstrukce budeme nazývat měrnými clonami.

Tyto měrné clony lze řadit do skupiny ostrohranných přelivů, proto v prvních odstavcích kapitoly definujeme pojem ostrohranný přeliv, představíme užití ostrohranných přelivů jejich výhody a nevýhody. Poté provedeme základní rozdělení měrných ostrohranných přelivů na přelivy bez a s boční kontrakcí. Pro obě varianty uvádíme příklady měrných přelivů s jejich základními tvary Q/h charakteristik. Jelikož se v této práci věnujeme měrným clonám s trojúhelníkovým výřezem, je detailně zpracována podkapitola věnující se podrobněji tomuto tématu.

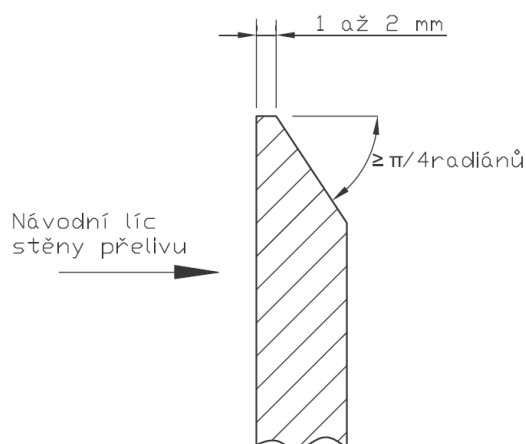
Ostrohranné přelivy se užívají zejména pro měření průtoků. Mezi jejich výhody patří jednoduchá a rychlá instalace, relativně vysoká přesnost měření, vysoká přizpůsobivost měrnému rozsahu. Mezi nevýhody můžeme řadit obtížnou nebo neekonomickou prefabrikaci, každý přeliv je originálem s vlastním projektem.

Jak je uvedeno v [1] dle obrázku 2, pro dosažení přesných výsledků při měření průtoků ostrohrannými přelivy se požaduje dokonalý přepad, volný přepadový paprsek (vzniká při dostatečném přístupu vzduchu pod něj) a dostatečné uklidnění přitékajícího proudu.



Obr. 2 Ostrohranný přeliv s trojúhelníkovým výřezem

Dále by měla být stěna přelivu rovinná, tuhá a kolmá ke stěnám a dnu přítokového žlabu. Návodní líc by měl být hladký (v blízkosti hrany výřezu musí jeho povrch odpovídat povrchu válcovaného plechu) a jednostranně upravený do břitu dle obrázku 3.



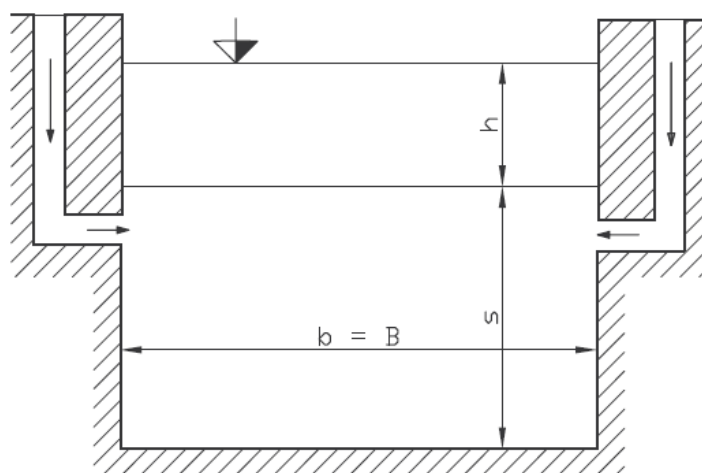
Obr. 3 Detail provedení břitu výřezu přelivu

2.1 Přelivy bez boční kontrakce

Přeliv bez boční kontrakce vzniká, jestliže se šířka přelivné hrany b rovná šířce B přítokového zpravidla obdélníkového koryta.

2.1.1 Ostrohranný přeliv s obdélníkovým výřezem bez bočního zúžení

Obdélníkový ostrohranný přeliv bez bočního zúžení a zavzdušněným prostorem pod přepadovým paprskem se obvykle dle [4] nazývá Bazinův, viz obrázek 4.



Obr. 4 Bazinův přeliv

Bazinův přeliv je základním typem ostrohranných přelivů, a protože byl podrobně prozkoumán, stal se základním měrným přelivem. Bazin odvodil pro stanovení přepadového množství přes přeliv rovnici dle [2], která se používá i pro výpočet jiných typů přelivů:

$$Q = mb\sqrt{2gh^{3/2}}, \quad (2.1)$$

kde m je Bazinův součinitel přepadu, který zahrnuje ztráty a kontrakci na přelivu a vliv přítokové rychlosti, a lze ho dle [2] vystihnout vztahem:

$$m = \left(0,405 + \frac{0,03}{h}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+s_1}\right)^2\right]. \quad (2.2)$$

S platností pro: h od 0,1 m do 1,24 m; pro b od 0,2 m do 2,0 m a pro svislou odlehlost přelivné hrany od dna přítokového žlabu s_1 od 0,2 m do 2,0 m.

2.2 Přelivy s boční kontrakcí

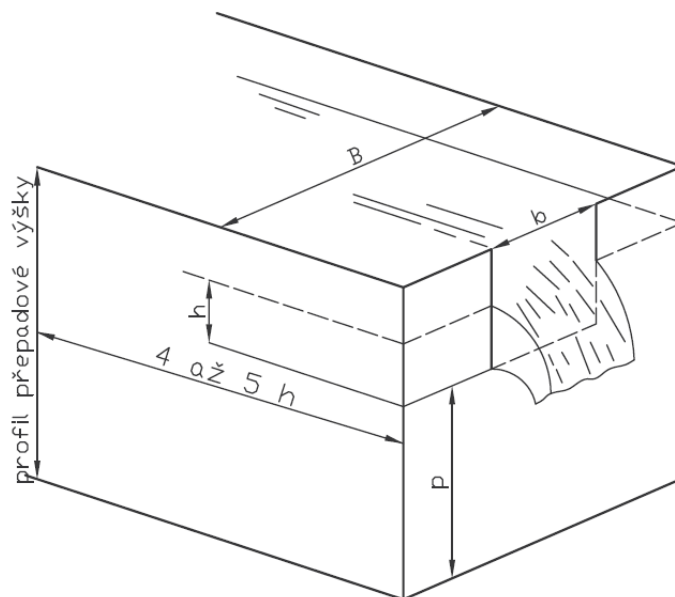
Dle [4] přeliv s boční kontrakcí vzniká, je-li přepad pouze v části přelivné stěny, nebo jestliže se k přelivné stěně žlab zužuje tedy $b < B$. Přelivy s boční kontrakcí mají tu výhodu, že vzduch má volný přístup pod paprsek, což je velmi důležité, protože změnou tlaku vzduchu pod paprskem se mění hodnota přepadového součinitele m , který je jinak obecně funkcí přepadové výšky a ostatních geometrických okrajových podmínek.

V následujícím textu budou popsány základní tvary Q/h charakteristik nejčastěji užívaných přelivů s bočním zúžením a v závěru této kapitoly se zaměříme na přístupy stanovení průtoku na Thomsonově přelivu.

2.2.1 Ostrohranný přeliv s obdélníkovým výřezem s bočním zúžením

Ostrohranný obdélníkový přeliv s bočním zúžením ($b < B$) je podle obrázku 5 složen z hradící stěny s obdélníkovým výřezem, který vyvolává kontrakci ve vertikálním i horizontálním směru. Proto musí být přepadová hrana i boční hrany přelivu vzdáleny ode dna

a stěn žlabu ve vzdálenosti rovnající se minimálně dvojnásobku přepadové výšky, jak je uvedeno v [3].



Obr. 5 Ostrohranný přeliv s pravoúhlým výřezem

Je vhodný k měření průtoku na malých vodních tocích, na vodních kanálech, ale i v laboratořích. Stanovení přepadového množství přes přeliv lze stanovit dle vzorce:

$$Q = m_b b \sqrt{2gh}^{3/2}. \quad (2.3)$$

Kde m_b je součinitel přepadu pro ostrohranný obdélníkový přeliv s bočním zúžením a jeho hodnota je:

$$m_b = \left[0,405 + \frac{0,003}{h} - 0,03 \left(1 - \frac{b}{B} \right) \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \right], \quad (2.4)$$

kde S je plocha průtočného průřezu ve výřezu a S_0 je plocha průtočného průřezu přívodního koryta, jak je uvedeno [2].

Pro představu o užití přelivu v praxi, je na obrázku 6 fotografie měrného přelivu umístěného v laboratoři.

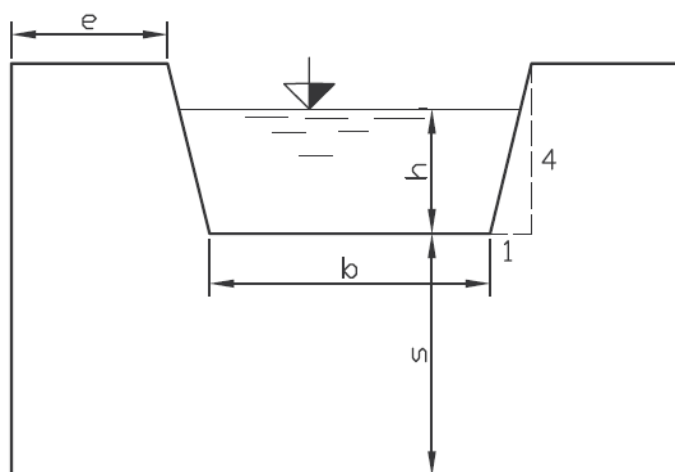


Obr. 6 Přeliv s obdélníkovým výřezem instalovaný v laboratoři

2.2.2 Ostrohranný přeliv s lichoběžníkovým výřezem.

Podle [4] Cipoletti určil základnu trojúhelníku v lichoběžníkovém výřezu přelivu tak, aby zvětšení přepadajícího průtoku zmíněným zvětšením přepadové plochy nahradilo zmenšení průtoku vyvolané postranním zúžením. Boční hrany tak mají sklon 4:1 (obrázek 7). Cipoletti udává vztah, pro který platí, že přepadový součinitel je konstantní:

$$Q = 1,86bh^{3/2} . \quad (2.5)$$



Obr. 7 Lichoběžníkový přeliv

Na obrázku 8 lze vidět využití měrného přelivu v praxi. Lichoběžníkový přeliv je instalován do měrného žlabu v laboratoři, kde probíhá hydrotechnický výzkum.



Obr. 8 Přeliv s lichoběžníkovým výřezem instalovaný v laboratoři

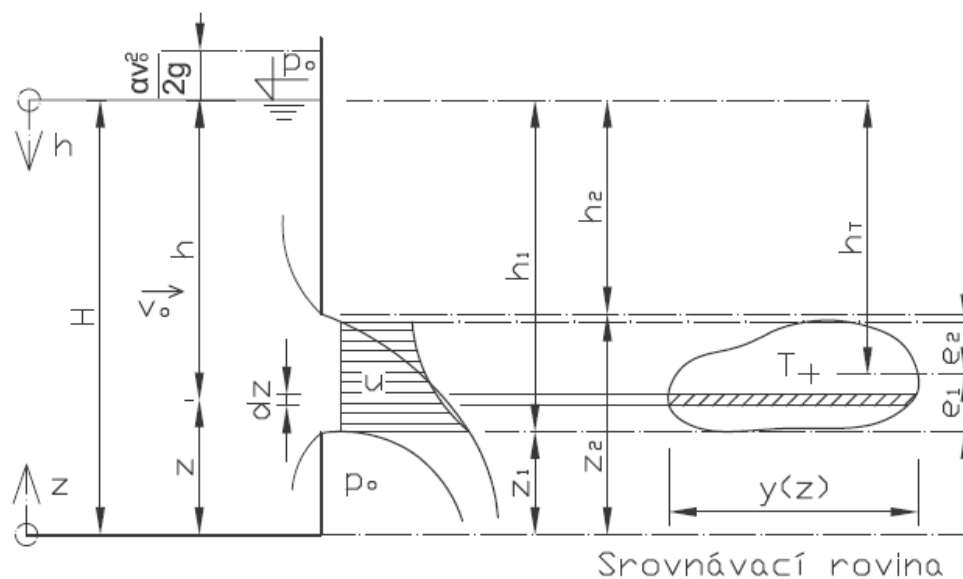
2.2.3 Přeliv s trojúhelníkovým výřezem

U trojúhelníkového přelivu je třeba oproti přelivům s obdélníkovým výřezem pro převedení shodného průtoku podstatně větší přepadová výška. Je tak citlivější na změnu průtoku a proto velmi vhodný pro jeho přesné měření. Dle [3] pokud na přelivu vzniká dokonalá kontrakce ze všech stran, je možné obvykle přítokovou rychlost zanedbat.

Jak je uvedeno v [2], při výpočtu přepadu přes ostrou hranu se stejně jako u jiných přelivů používá postupu shodného s výpočtem volného výtoku otvorem ve svislé stěně (obrázek 9). Celkový průtok volného výtoku otvorem obdržíme z rovnice 2.8.

$$Q = \mu \sqrt{2g} \int_{h_2}^{h_1} \left(h + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \right)^{1/2} y dz, \quad (2.8)$$

kde h_1 je svislá odlehlost dolní hrany otvoru pod hladinou a h_2 svislá odlehlost horní hrany otvoru pod hladinou.



Obr. 9 Výtok otvorem ve svislé stěně

Dosazením rovnice ve smyslu obrázku 11 vyjadřující šířku přelivu y v úrovni $H - h$:

$$y = 2(H - h) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (2.9)$$

do rovnice (2.10), kde zanedbáváme vliv přítokové rychlosti a upravíme tak, že její integrace je v mezích od nejnižšího bodu přelivné hrany po hladinu:

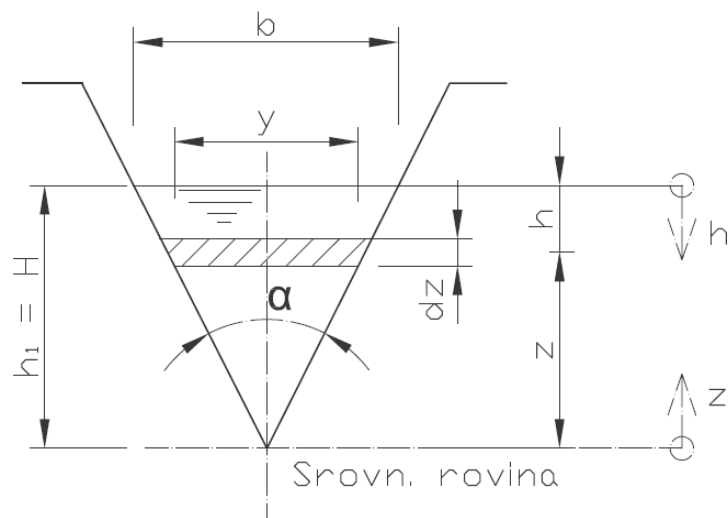
$$Q = \mu \sqrt{2g} \int_0^{h_1} h^{1/2} y dz, \quad (2.10)$$

obdržíme vztah pro výpočet přepadového množství přes trojúhelníkový přeliv:

$$Q = \mu \sqrt{2g} \int_0^{h_1} h^{1/2} \left[2(H - h) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right] dz, \quad (2.11)$$

$$Q = 2\mu \sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left[H \frac{2}{3} h_1^{3/2} - \frac{2}{3} h_1^{5/2} \right]. \quad (2.12)$$

Dle obrázku 10 lze vidět, že $H = h_1$.



Obr. 10 Schéma výpočtu průtoku přes trojúhelníkový přeliv

Převýšení hladiny nad nejnižší úrovní výřezu přelivné hrany budeme dále značit h a nazývat přepadovou výškou:

$$Q = 2\mu\sqrt{2g} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left[\frac{2}{3} h^{5/2} - \frac{2}{5} h_1^{5/2} \right], \text{ po úpravě} \quad (2.13)$$

$$Q = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h^{5/2}, \quad (2.14)$$

kde součinitel $\mu \approx (0,56 \sim 0,60)$ a je funkcí $\mu = f(h, \alpha)$.

Pro úplnost uvedme i přístupy, které předpisuje ČSN EN ISO 1438-1 [1].

V [1] je závislost pro veškeré vrcholové úhly výřezu od 20° do 100° uvedena ve tvaru:

$$Q = \frac{8}{15} C_e \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_e^{5/2}, \quad (2.15)$$

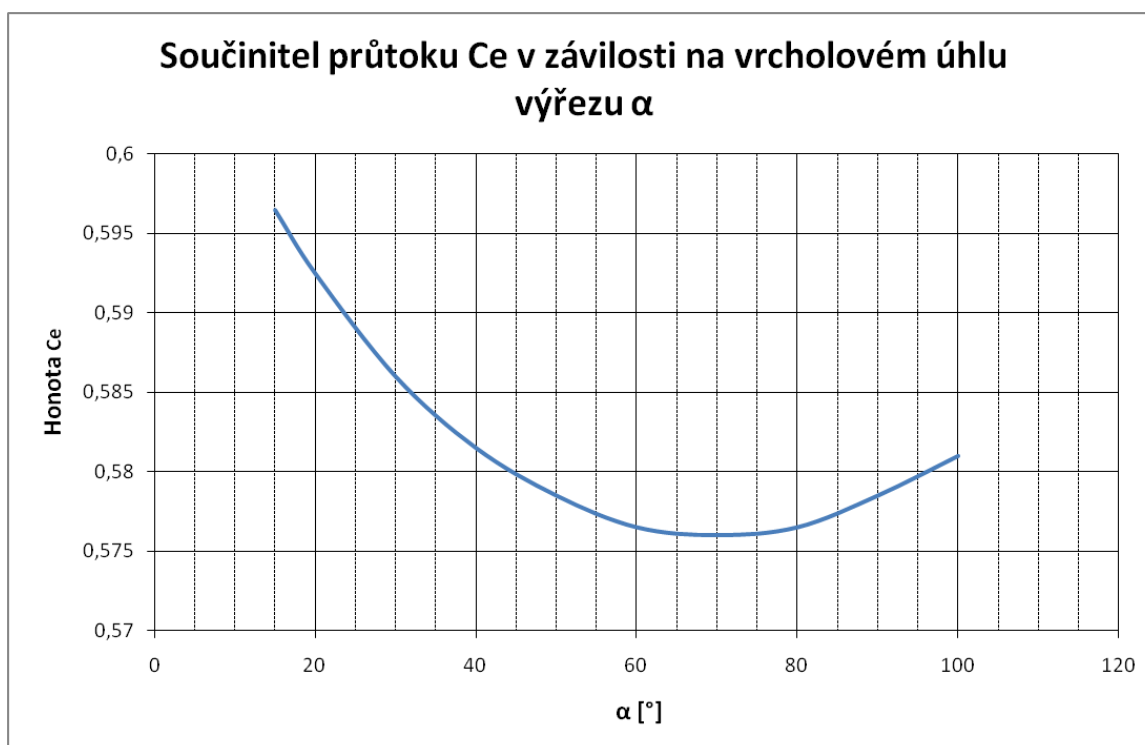
kde C_e je součinitel průtoku a h_e efektivní přepadová výška. Součinitel průtoku C_e byl určen experimentálně jako funkce tří proměnných.

$$C_e = f\left(\frac{p}{B}, \frac{h}{p}, \alpha\right),$$

kde p je výška vrcholu výřezu nade dnem přítokového koryta, B je šířka přítokového koryta a h_e je definováno rovnicí:

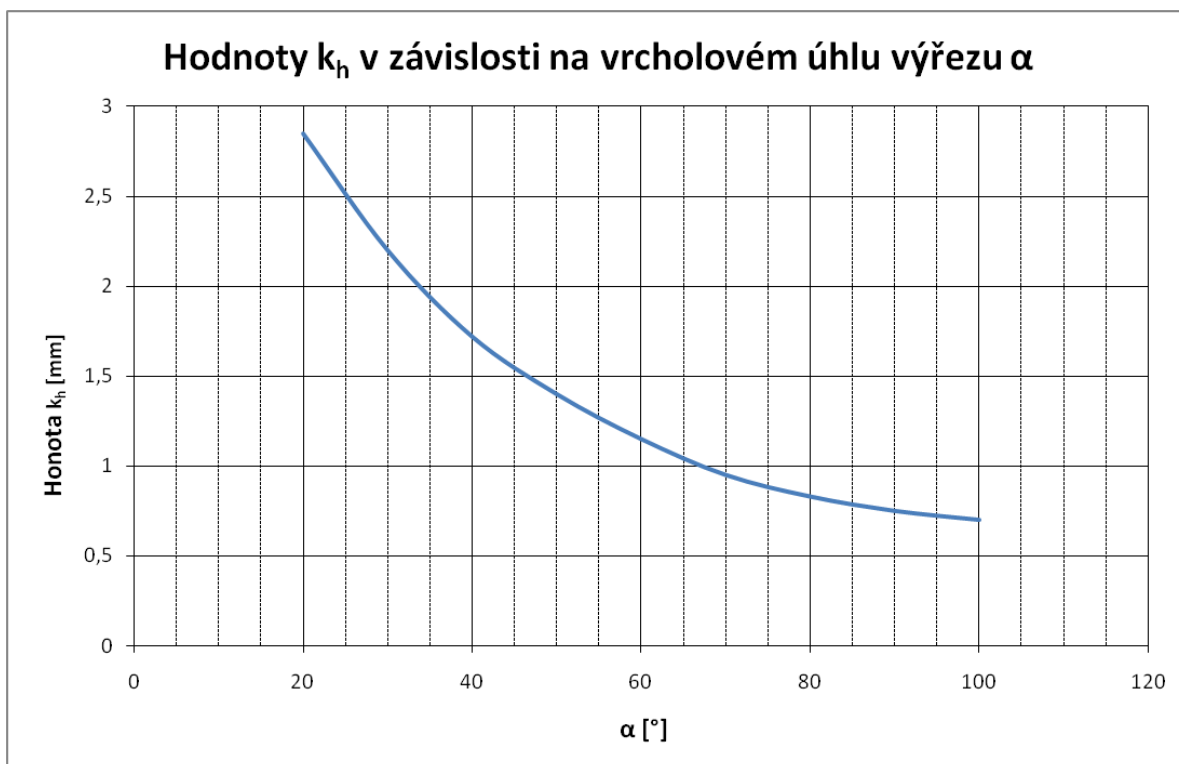
$$h_e = h + k_h, \quad (2.16)$$

ve které k_h je experimentálně určená veličina, která kompenzuje kombinované účinky viskozity a povrchového napětí. Pro trojúhelníkový přeliv s vrcholovým úhlem 90° jsou v ČSN EN ISO 1438-1 znázorněny hodnoty C_e určené experimentálně pro široký rozsah hodnot h/p a p/B . k_h je v tomto případě konstantou o hodnotě 0,00085 m. Pro vrcholové úhly jiné než 90° experimentální data nepostačují k definování funkční závislosti C_e na h/p a p/B . Pokud je však plocha výřezu relativně malá oproti ploše průřezu přítokového koryta, přítoková rychlost je zanedbatelná a zanedbatelný je proto i vliv h/p a p/B . Pro tyto podmínky přelivu s úplnou kontrakcí jsou na grafu 1 znázorněny experimentálně určené hodnoty C_e závislé pouze na úhlu výřezu α .



Graf 1

Odpovídající hodnoty k_h jsou uvedeny na grafu 2.



Graf 2

Z důvodu nebezpečí chyby v měření a z důvodu nedostatku experimentálních dat jsou pro použití vzorce 2.15 stanoveny následující praktické meze:

- úhel α musí ležet v intervalu od 20° do 100° ,
- h/p nesmí být větší než 0,35,
- p/B musí ležet v intervalu od 0,1 do 1,5,
- h nesmí být menší než 0,06 m,
- p nesmí být menší než 0,09 m.

Na obrázku 11 můžeme vidět osazení trojúhelníkového přelivu do měrného žlabu v laboratoři. Takto instalované přelivy jsou proměřovány řadou průtoků, ke kterým jsou zaznamenávány příslušné přepadové výšky. Výsledkem těchto hydrotechnických výzkumů je Q/h charakteristika daného přelivu.



Obr. 11 Přeliv s trojúhelníkovým výřezem instalovaný v laboratoři

3 CÍLE PRÁCE

Cílem předložené diplomové práce bylo stanovit jednoznačnou závislost průtoku Q měřicími clonami na protiproudě měřené výšce přepadového paprsku h . Měrnou clonou rozumíme do koryta pevně instalovanou konstrukci, která způsobí přechod proudění z režimu říčního do režimu bystrinného při vzniku kritické hloubky v prostoru clony. Primárně se měří úroveň hladiny protiproudě před clonou a z ní se usuzuje na průtok shodně, jako je to u jiných přelivných konstrukcí. Nejčastějšími tvary přelivů jsou trojúhelníkový, obdélníkový, lichoběžníkový, ale používá se i řada dalších jiných tvarů.

V našem případě, jak už bylo řečeno v 2. kapitole, se zvolily měrné clony s trojúhelníkovým výřezem, jež jsou v praxi při monitoringu průtoků na stokových sítích využívány nejčastěji.

Stejně tak jsou užívány při stanovení průtoku a proteklého objemu při vypouštění odpadních vod do vod povrchových ve smyslu [10], a to v případě, pokud není instalováno měřidlo nebo měřicí systém. Průtok, resp. proteklý objem se následně stanoví na základě jednorázových měření, minimálně na základě jednoho týdenního měření za kalendářní rok při průměrných podmínkách průtoku s vyloučením výsledků naměřených při dlouhotrvajících nebo intenzivních srážkách nebo bezprostředně po nich.

Na obrázku 12 lze vidět, vstupní šachtu do kanalizace, na které se provádí měření pomocí měrné clony.



Obr. 12 Kanalizační šachta s vyhodnocovací jednotkou

U vstupu je vyhodnocovací jednotka, ve které je naprogramovaná výsledná Q/h charakteristika. Dle přepadové výšky naměřené ultrazvukovou sondou, případně sondou tlakovou je vyhodnocován aktuální průtok (obrázek 13).



Obr. 13 Vlevo ultrazvuková sonda, vpravo tlaková sonda

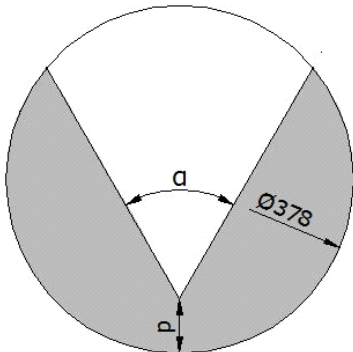
Instalace měrné clony do kanalizačního potrubí je často náročným úkolem. Pracuje se ve zhoršených podmínkách, kdy prostor pro instalaci je většinou stísněný a probíhá za plného

provozu stokové sítě. Utěsnění a fixování měrné clony je realizováno za pomoci silikonu, vzpěry, případně přikotvení konstrukce clony do potrubí (obrázek 14).



Obr. 14 Měření průtoku v kanalizaci pomocí clony s trojúhelníkovým výřezem

Při návrhu trojúhelníkového výřezu clony je třeba zvolit úhel jejího výřezu a velikost svislé odlehlosti nejnižší úrovně výřezu ode dna. V našem případě jsme určovali Q/h charakteristiky pro celkem 12 měrných clon o vnitřním průměru DN 378, jejichž tvary a geometrické rozměry jsou patrné z tabulky 1.

Schéma měrné clony	α [°]	p [mm]
	15	0
		30
		60
		100
	30	0
		30
		60
		100
	60	0
		30
		60
		100

Pozn:

α - úhel výřezu měrné clony

p - svislá odlehlost nejnižšího bodu výřezu měrné clony nade dnem přítokového koryta

\varnothing - vnitřní průměr potrubí v mm

Tab. 1 Přehled geometrických parametrů měrných clon

Clony jsme volili tak, abychom mohli nabídnout širokou variabilitu přelivu pro různé průtokové poměry. Úhly větší jak 60° jsou nevhodné, protože přepadová výška je, vlivem velkého rozpětí úhlu, malá. Clonu o výřezu 15° jsme zvolili z důvodu použití pro měření velmi malých průtoků. V případě výřezu s úhlem 60° byl důvod opačný. Pro monitoring „středních“ průtoků byl zvolen výřez s úhlem 30° . Požadavkem je, aby byl přeliv schopen převést i větší hodnoty průtoků, a přitom nevykazoval velké nejistoty ve stanovení průtoků při průtocích menších.

Hodnoty svislé odlehlosti ode dna koryta jsme volili tak, aby byla zajištěna dostatečná kontrakce a byl potlačen vliv úrovně hladiny dolní vody. Současně svislá odlehlost ode dna ovlivňuje propustnost splavenin. V případě zanesení měrné clony splaveninami zůstává otázkou, zda zanášení má vliv na výslednou Q/h charakteristiku. Jedná se však o velmi rozsáhlou problematiku, jež by mohla být tématem pro další odbornou práci.

Pro všechny tvarové úpravy měrných clon uvedené v tab. 1, budou získané Q/h charakteristiky, a ty ve smyslu zákonů modelové podobnosti, budou přepočítány i na větší průměry potrubí až do DN 1500. Dále budou určeny hodnoty nejistot ve stanovení průtoků při praktickém nasazení konkrétní clony.

4 POPIS LABORATOŘE, MĚŘICÍ TECHNIKY A MĚŘENÍ



Obr. 15 Hydraulická laboratoř – budova F

Měření proběhla v hydraulické laboratoři budovy F (obrázek 15). Celková koncepce laboratoře je založena na recirkulačním systému. Voda do měrných tratí je přečerpávána z podzemní nádrže čtyřmi ponornými odstředivými čerpadly řízenými měniči frekvence.

Celková průtočná kapacita systému je přes 230 l/s. Ovládání hydraulického okruhu probíhá za pomoci řídicího počítače a regulačních prvků umístěných v armaturní komoře.

Veškerá měření se uskutečnila na žlabu šířky 0,413 m a délky 12,5 m. Tento žlab je sklopný a prosklený. V případě našeho měření nebyla využita možnost nastavení sklonu žlabu a všechna měření se tak prováděla na trati s nulovým podélným sklonem.

Měření průtoku je v tomto měrném žlabu realizováno magneticko-indukčním průtokoměrem DN 150, umístěným na přívodním potrubí do žlabu. Jak je uvedeno v [7] magneticko-indukční průtokoměry využívají fyzikálního jevu popsaného Faradayovým zákonem o elektromagnetické indukci. Vyhodnocovací jednotka zobrazuje s nastavenou mírou tlumení měřeného signálu okamžitý průtok, který zaznamenává jako „proteklý“ objem v čase. Mezi výhody patří vysoká přesnost měření (velikost nejistoty v tomto případě je 0,3%), stabilní provoz a téměř nulová hydraulická ztráta.

V případě malých průtoků pod 3 l/s je voda vedena přes tzv. bypass, na kterém je instalován taktéž magneticko-indukční průtokoměr DN 32. Oba tyto magneticko-indukční průtokoměry jsou pravidelně kalibrovány v Autorizovaném metrologickém středisku.



Obr. 16 Měrný žlab a Thomsonův přeliv umístěn na jeho začátku

Na začátku měrného žlabu je pro kontrolu měření průtoku umístěn Thomsonův přeliv (obrázek 16) a na jeho konci je odpadní šachta pro plynulé odvedení vody tak, aby nedocházelo k ovlivnění přepadového paprsku hladinou dolní vody.

Do tohoto žlabu bylo umístěno PVC potrubí s vnitřním průměrem DN 378 (obrázek 17). Přibližně uprostřed tohoto potrubí byl pro snazší instalaci měrných clon vyříznut obdélníkový otvor.



Obr. 17 PVC potrubí DN 400 umístěné v měrném žlabu

Instalace měrných clon byla provedena po důkladném vysušení měrné trati. Měrné clony byly nejprve přichyceny šrouby ke konstrukci zabudované v potrubí a následně všechny místa, kde by mohlo docházet k úniku vody, byly pečlivě vyplněny silikonem. Přichycení měrné clony k potrubí je znázorněno na obrázku 18.



Obr. 18 Detail zabudování měrné clony o výřezu 15° do potrubí DN 378

Stanovení velikosti přepadové výšky bylo provedeno za pomoci hrotového digitálního posuvného měřidla. Jak je uvedeno v [1] profil měření přepadové výšky musí být umístěn v dostatečné vzdálenosti od přelivu, aby nebyl ovlivněn oblastí poklesu hladiny způsobeného formováním přepadového paprsku. Na druhé straně musí být dostatečně blízko přelivu, aby ztráta mechanické energie mezi profilem měření hladiny a přelivem byla zanedbatelná. Půdorysná protiproudň vzdálenost místa měření výšky přepadového paprsku by se měla pohybovat v intervalu (3-5) násobku maximální hodnoty výšky přepadového paprsku. Jak je uvedeno v [10] v praxi se však tyto vzdálenosti často nedodržují a snímače bývají umístěny v podstatně bližší vzdálenosti, než je doporučováno. V rámci zpracování [10] byl proto proveden experimentální výzkum s přelivem s trojúhelníkovým výřezem. Bylo zjištěno z rozsáhlých měření, že výsledky oproti běžně doporučovaným požadavkům jsou podstatně mírnější a bezpečná hodnota v případě přelivů s trojúhelníkovým přelivem je 1 - 1,5 násobku maximální přepadové výšky. Proto bylo hrotové měřidlo umístěno 300 mm protiproudň za měrnou clonou (obrázek 19).



Obr. 19 Hrotové měřidlo umístěné 300 mm před přelivem

Dále bylo zapotřebí určit nejnižší úroveň vrcholu výřezu přelivu. V [1] se hovoří, že přesnost měření přepadové výšky je významně závislá na určení srovnávací roviny, která je definována jako čtení vodočtu odpovídající úrovni vrcholu trojúhelníkového výřezu. Nejnižší

úroveň vrcholu výřezu musí být určena s velkou pečlivostí a v případě nutnosti pravidelně kontrolována.

Po ustálení průtoku v hydraulickém systému laboratoře byly pro každý stav odečteny tři hodnoty průtoku a tři hodnoty přepadové výšky. Průtok byl opisován z vyhodnocovací jednotky (obrázek 20) a přepadová výška byla měřena za pomoci hrotového digitálního posuvného měřidla.



Obr. 20 Vyhodnocovací jednotka

Každá clona byla proměřena za 13 různých průtoků v rozsahu od 0,1 l/s až po její maximum. Maximální průtok závisel na úhlu výřezu α a na hodnotě p , tedy velikosti svislé odlehlosti nejnižšího bodu výřezu nade dnem přítokového koryta. Minimální průtok měrnou clonou byl omezen přepadovou výškou 3 cm, při které již zpravidla dochází k ovlivnění tvaru přepadového paprsku povrchovým napětím vody.

5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Veškeré získané výsledky byly zpracovány pomocí softwaru MS Excel. Zpracování výsledků bylo postupné. Nejprve se vyhodnotily Q/h charakteristiky jednotlivých měrných clon o různých hodnotách p , následně se data jednoho úhlu o různých hodnotách p sloučila a získala se tak výsledná Q/h charakteristika pro daný úhel výřezu. Následovalo porovnání se vztahy uvedenými v ČSN EN ISO 1438-1 [1], které byly uvedeny v kapitole 2 a výpočet

nejistoty (přesnosti) stanovených Q/h charakteristik. Takto získané výsledky pro jednotlivé úhly výřezu příslušných clon byly ve smyslu zákonů modelové podobnosti přepočteny na větší průměry potrubí.

Jak bylo uvedeno výše, nejprve jsme každou clonu proměřili za třinácti průtoků. Z průměrů naměřených hodnot přepadové výšky a průtoků byl pro každý průtok Q_i určen jeho regresní odhad Q_i^R závislý na neznámé proměnné C a hloubce h_i , ve smyslu vzorce 2.15 uvedeném v kapitole 2. Tento postup byl realizován za pomoci metody nejmenších čtverců, kdy se určil součet čtverců reziduí (nebo také chyb) regresního odhadu jako suma druhých mocnin rozdílů regresních odhadů od hodnot změřených Q_i ve smyslu vzorce (7.3) [6]. Pomocí numerických optimalizačních metod byla pak tato suma minimalizována, tedy:

$$\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i^R)^2 = \pi \rightarrow MIN . \quad (5.1)$$

Dále jsou uvedeny vypočítané hodnoty koeficientu C pro všechny typy měrných clon. Původní úvaha při hledání funkčního tvaru Q/h charakteristik byla postavena na hledání dvou koeficientů C a B dle vzorce:

$$Q_i = C \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h_i^B \quad (5.2)$$

Tento přístup však způsobil výrazné komplikace při přepočtu takto získaných Q/h charakteristik pro měrné clony instalované do větších průměrů potrubí. Díky existenci dvou koeficientů C a B nebylo možné stanovit jednoznačnou analyticky odvoditelnou závislost. Se změnou průměru potrubí totiž docházelo i ke změně obou koeficientů. V případě ponechání konstantní hodnoty B o velikosti 2,5 (což je v souladu s teorií přepadu přes přeliv s trojúhelníkovým výřezem) zůstává C pro všechny průměry taktéž konstantní. Proložení křivky za pomoci dvou koeficientů je sice přesnější, nicméně proložením s koeficientem C zachováváme fyzikální podstatu odvozené rovnice a nepřesnost způsobená nedokonalým proložením je započítána v příslušné hodnotě nejistoty Q/h charakteristiky.

Tímto způsobem byly vypočítány regresní odhady pro jednotlivé měrné clony se svislou odlehlostí vrcholu výřezu ode dna tedy $p = 0$ mm, 30 mm, 60 mm a 100 mm.

Při výpočtech byl stanoven bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h , na 68% hladině spolehlivosti, vyjádřený vzorcem:

$$s = \sqrt{\frac{s_0}{u-p}} , \quad (5.3)$$

kde s_0 je suma součtu reziduí, u je počet naměřených hodnot a P je počet stupňů volnosti, v našem případě je to počet koeficientů (pouze C) v regresní rovnici $P=1$. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h určuje chybu jednoho konkrétního měření a vytváří pásmo v okolí regresní přímky (získané Q/h charakteristiky), ve kterém lze z 68 % pravděpodobností očekávat jednotlivé měřené hodnoty.

Jelikož bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h určuje chybu jednoho konkrétního měření, v další části této práce (kapitola 9) jsme řešili i přesnost výsledné regresní funkce. Cílem tak bylo určit odhad střední funkční hodnoty Q/h neboli chybu odhadu regresní funkce.

Jako další krok byly pro srovnání vyneseny do vyhodnocených regresních závislostí Q/h charakteristiky získané z ČSN EN ISO 1438-1 dle vztahu 2.15.

Z grafu 1 jsme odečetli hodnoty pro výřez o 15° , 30° a 60° . Tedy výsledná Q/h charakteristika dle [1] pro 15° je:

$$Q_{\check{C}SN15} = 0,597 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_s^{2,5}, \quad (5.4)$$

Q/h charakteristika pro 30° má tvar

$$Q_{\check{C}SN30} = 0,587 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_s^{2,5}, \quad (5.5)$$

a Q/h charakteristika pro 60° má výslednou rovnici

$$Q_{\check{C}SN60} = 0,577 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_s^{2,5}. \quad (5.6)$$

V předchozím textu jsme uvedli postupy všech výpočtů, které jsme aplikovali pro získání regresních funkcí. V další části textu se zaměříme již na přesné zpracování výsledků jednotlivých měrných clon.

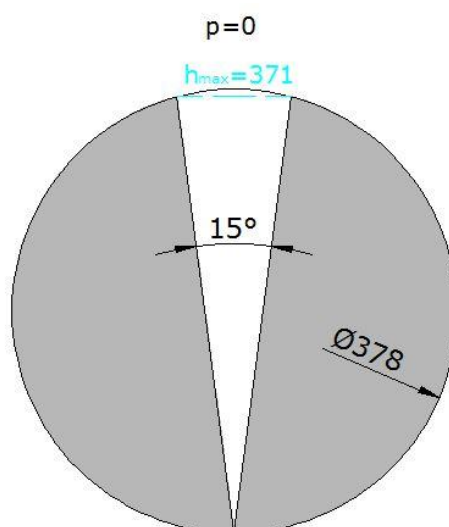
6 MĚRNÁ CLONA O VÝŘEZU 15°



Obr. 21 Měrná clona o výřezu 15°

U této měrné clony musíme dbát na přesnou instalaci do potrubí, protože při malé odchylce úhlu α u takto malého úhlu výřezu dochází k velkým rozdílům v přepadovém množství. Na jednotlivých obrázcích, uvedených u každého typu měrné clony, jsou uvedeny rozměry potrubí, velikost úhlu a maximální možná dosažitelná přepadová výška. V každé podkapitole jsou uvedeny naměřené hodnoty s jejich regresním odhadem, výsledná Q/h charakteristika i s grafickým vyjádřením a vypočítaná hodnota směrodatné odchylky. Názvy podkapitol jsou voleny ve smyslu následujícího klíče: první hodnota je velikost výřezu měrné clony ve stupních a druhá hodnota vyjadřuje svislou odlehlost vrcholu výřezu ode dna v milimetrech.

6.1 Měrná clona 15°-0



Obr. 22 Měrná clona 15 - 0

Na obrázku 22, můžeme vidět dispozici přelivu. V tabulce 2 jsou uvedeny naměřené hodnoty, výpočet regresního odhadu a suma druhých mocnin rozdílů regresních odhadů od hodnot naměřených.

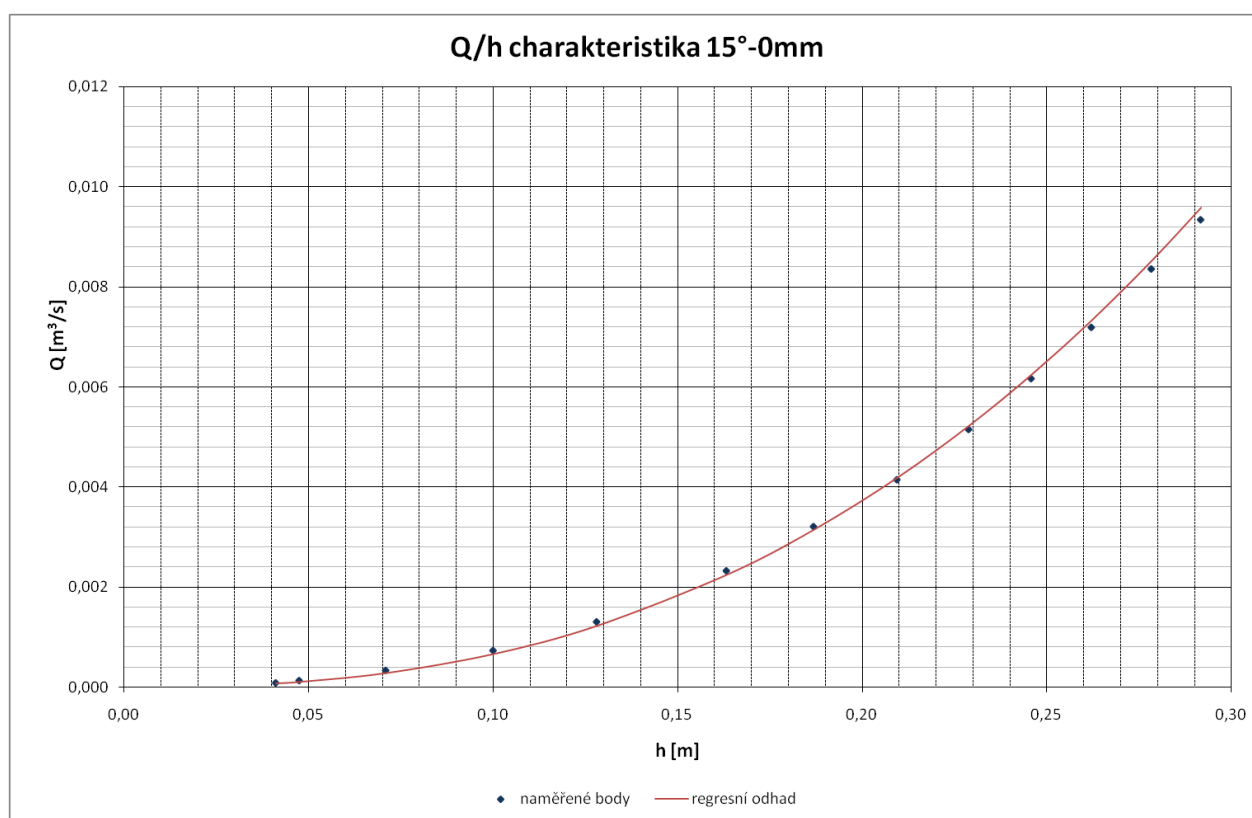
Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{15-0}	Q_{15-0}	Q_{15-0}^R	$(Q_{15-0} - Q_{15-0}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0411	0,00009	0,00007	2,30E-10
0,0474	0,00013	0,00010	9,66E-10
0,0709	0,00034	0,00028	3,31E-09
0,1000	0,00073	0,00066	5,48E-09
0,1280	0,00131	0,00122	6,97E-09
0,1632	0,00233	0,00224	6,83E-09
0,1868	0,00321	0,00315	4,01E-09
0,2094	0,00415	0,00418	1,44E-09
0,2288	0,00515	0,00522	5,43E-09
0,2458	0,00617	0,00625	6,16E-09
0,2621	0,00719	0,00733	2,05E-08
0,2783	0,00836	0,00852	2,76E-08
0,2917	0,00934	0,00958	5,96E-08
Σ			1,49E-07

Tab. 2 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 15°- 0

Vzhledem k velikosti svislé odlehlosti vrcholu výřezu ode dna ($p = 0$ mm) má tato měrná clona ze všech výřezů 15° maximální kapacitu. Regresní analýzou dospějeme k výsledné závislosti průtoku na přepadové výšce:

$$Q_{15-0}^R = 0,671 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (6.1)$$

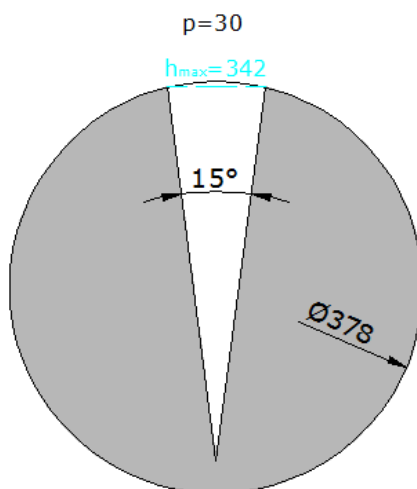
a její zobrazení můžeme vidět na grafu 3.



Graf 3

Jak lze vidět, maximální průtok měrnou clonou lze očekávat 9,34 l/s s přepadovou výškou 0,292 m a nejmenší přepadová výška v tomto případě byla 0,04 m při průtoku 0,09 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h ve smyslu (5.3) je roven 0,111 l/s.

6.2 Měrná clona 15° - 30



Obr. 23 Měrná clona 15° - 30

Z obrázku 23 jsou patrné rozměry tohoto typu přelivu. Maximum, které jsme byli schopni naměřit, uvedené v tabulce 3, bylo 7,34 l/s při přepadové výšce 0,264 m. Minimální přepadová výška byla 0,045 m při průtoku 0,09 l/s.

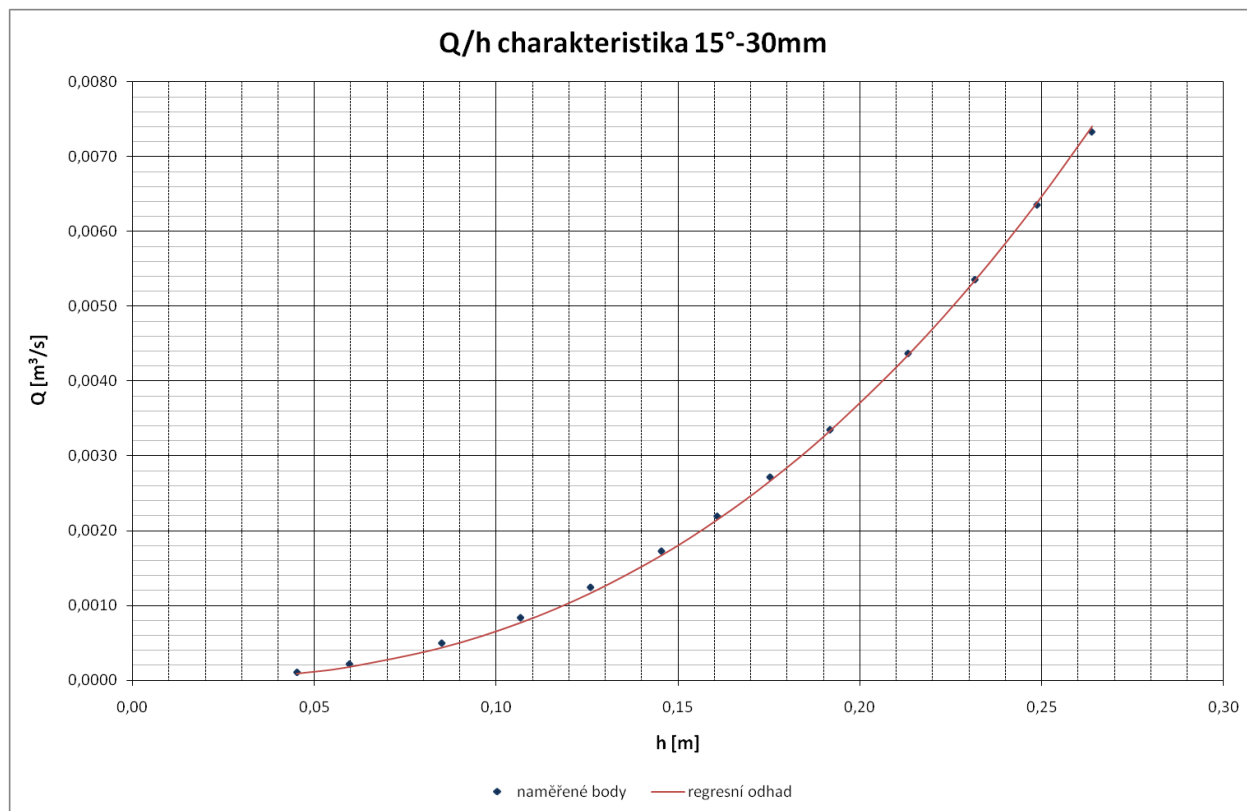
Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{15-30}	Q_{15-30}	Q_{15-30}^R	$(Q_{15-30} - Q_{15-30}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0452	0,00011	0,00009	4,03E-10
0,0596	0,00022	0,00018	1,64E-09
0,0850	0,00050	0,00044	4,06E-09
0,1067	0,00084	0,00077	4,95E-09
0,1259	0,00125	0,00117	6,58E-09
0,1454	0,00173	0,00167	3,50E-09
0,1608	0,00220	0,00215	2,48E-09
0,1753	0,00272	0,00267	2,95E-09
0,1918	0,00335	0,00334	2,36E-10
0,2133	0,00437	0,00435	4,48E-10
0,2317	0,00536	0,00535	8,12E-11
0,2488	0,00636	0,00639	1,16E-09
0,2638	0,00734	0,00741	4,73E-09
Σ			3,32E-08

Tab. 3 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 15° - 30

Optimalizací koeficientu C jsme dospěli k výsledné závislosti ve smyslu vzorce:

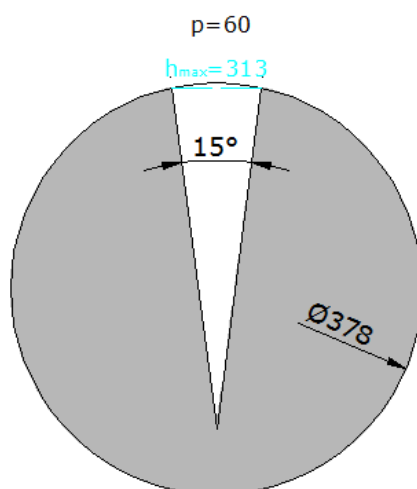
$$Q_{15-30}^R = 0,6663 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (6.2)$$

V grafu 4 je vynesená výsledná regrese. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,053 l/s.



Graf 4

6.3 Měrná clona 15° - 60



Obr. 24 Měrná clona 15° - 60

Maximální přepadová výška, která byla naměřena u tohoto typu měrné clony, je 0,232 m. Vypočítané a naměřené hodnoty tohoto typu přelivu jsou uvedeny v tabulce 4.

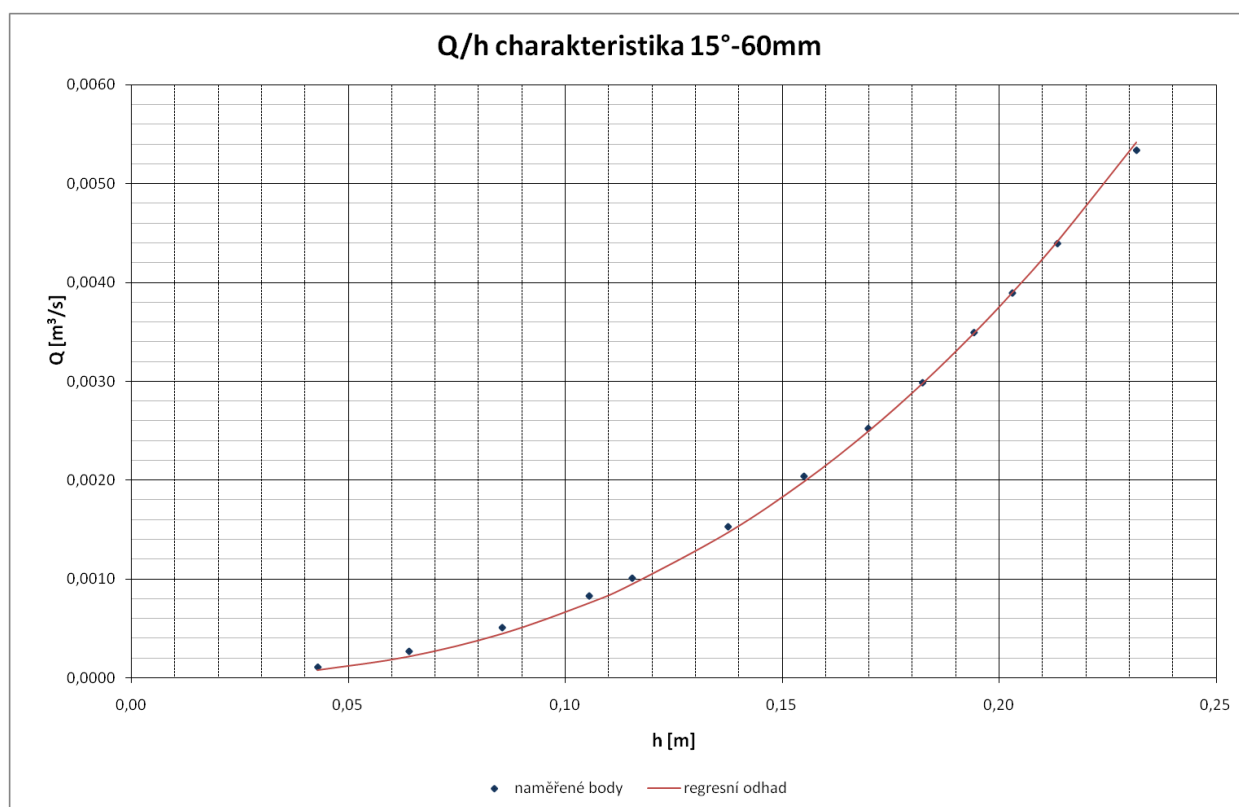
Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{15-60}	Q_{15-60}	Q_{15-60}^R	$(Q_{15-60} - Q_{15-60}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0429	0,00011	0,00008	8,94E-10
0,0640	0,00027	0,00022	2,81E-09
0,0854	0,00051	0,00045	3,93E-09
0,1055	0,00083	0,00076	5,25E-09
0,1154	0,00101	0,00095	3,80E-09
0,1375	0,00153	0,00147	3,63E-09
0,1550	0,00204	0,00198	3,26E-09
0,1698	0,00252	0,00249	1,06E-09
0,1823	0,00299	0,00298	1,11E-10
0,1942	0,00349	0,00348	9,28E-11
0,2030	0,00389	0,00389	2,60E-13
0,2134	0,00439	0,00441	3,18E-10
0,2316	0,00534	0,00541	6,08E-09
Σ			3,12E-08

Tab. 4 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 15° - 60

Výsledná Q/h charakteristika po optimalizaci koeficientu C je:

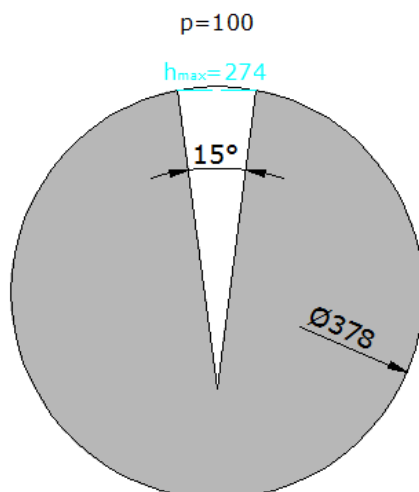
$$Q_{15-60}^R = 0,675 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (6.3)$$

A jak lze vidět v grafu 5, maximální hodnoty průtoku byly 5,34 l/s s přepadovou výškou 0,23 m a nejmenší naměřené hodnoty dosáhly velikosti 0,11 l/s pro přepadovou výšku o velikosti 0,43 m. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,051 l/s.



Graf 5

6.4 Měrná clona 15° - 100



Obr. 25 Měrná clona 15° - 100

V tomto případě je měrná clona nejméně kapacitní. Během našeho měření převedla maximální průtok o hodnotě 4,37 l/s při přepadové výšce 0,211 m , jak je uvedeno v tabulce 5.

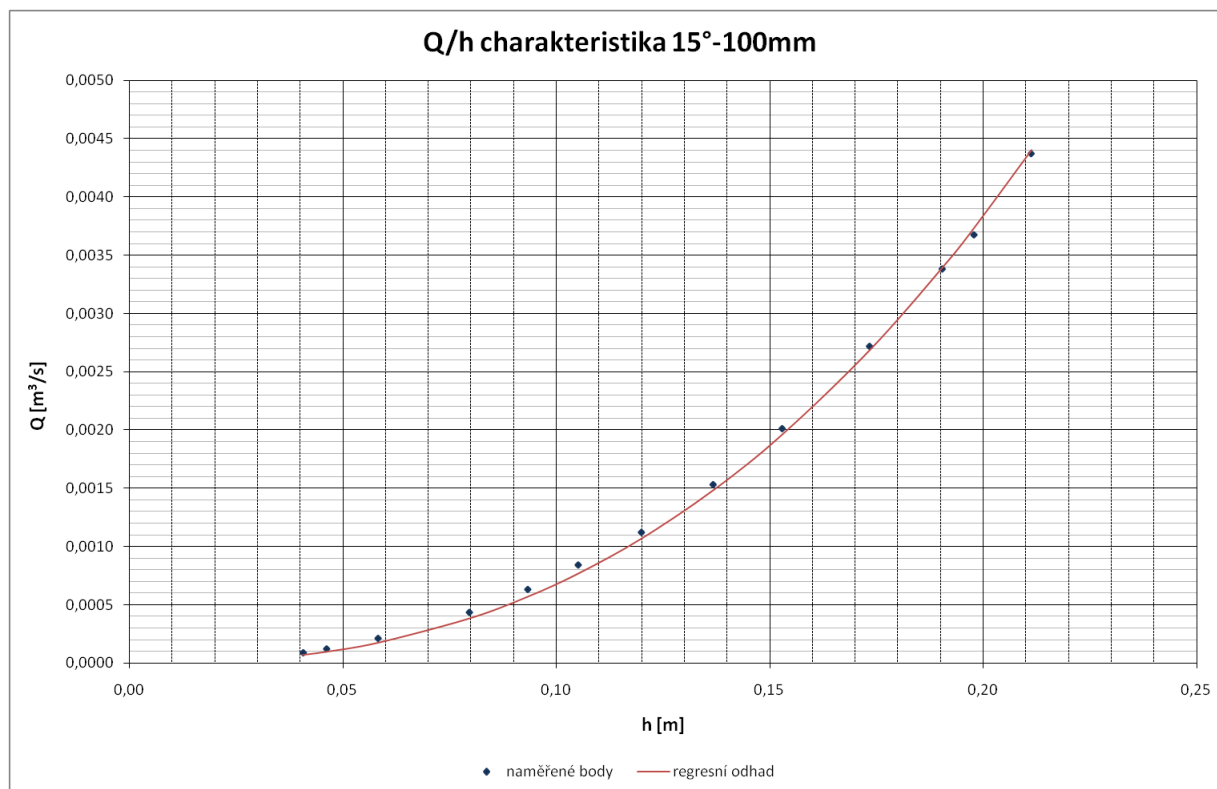
Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{15-100}	Q_{15-100}	Q_{15-100}^R	$(Q_{15-100} - Q_{15-100}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0407	0,00009	0,00007	2,30E-10
0,0461	0,00012	0,00010	4,83E-10
0,0582	0,00021	0,00018	1,21E-09
0,0796	0,00043	0,00038	2,50E-09
0,0933	0,00063	0,00057	3,59E-09
0,1051	0,00084	0,00077	5,16E-09
0,1199	0,00112	0,00107	2,71E-09
0,1367	0,00153	0,00148	2,24E-09
0,1529	0,00201	0,00196	2,39E-09
0,1734	0,00272	0,00269	9,80E-10
0,1904	0,00338	0,00339	2,20E-10
0,1978	0,00367	0,00374	3,96E-09
0,2112	0,00437	0,00440	9,84E-10
Σ			2,66E-08

Tab. 5 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 15° - 100

Výsledná Q/h charakteristika po optimalizaci koeficientu pro 15°-100 je:

$$Q_{15-100}^R = 0,690 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (6.4)$$

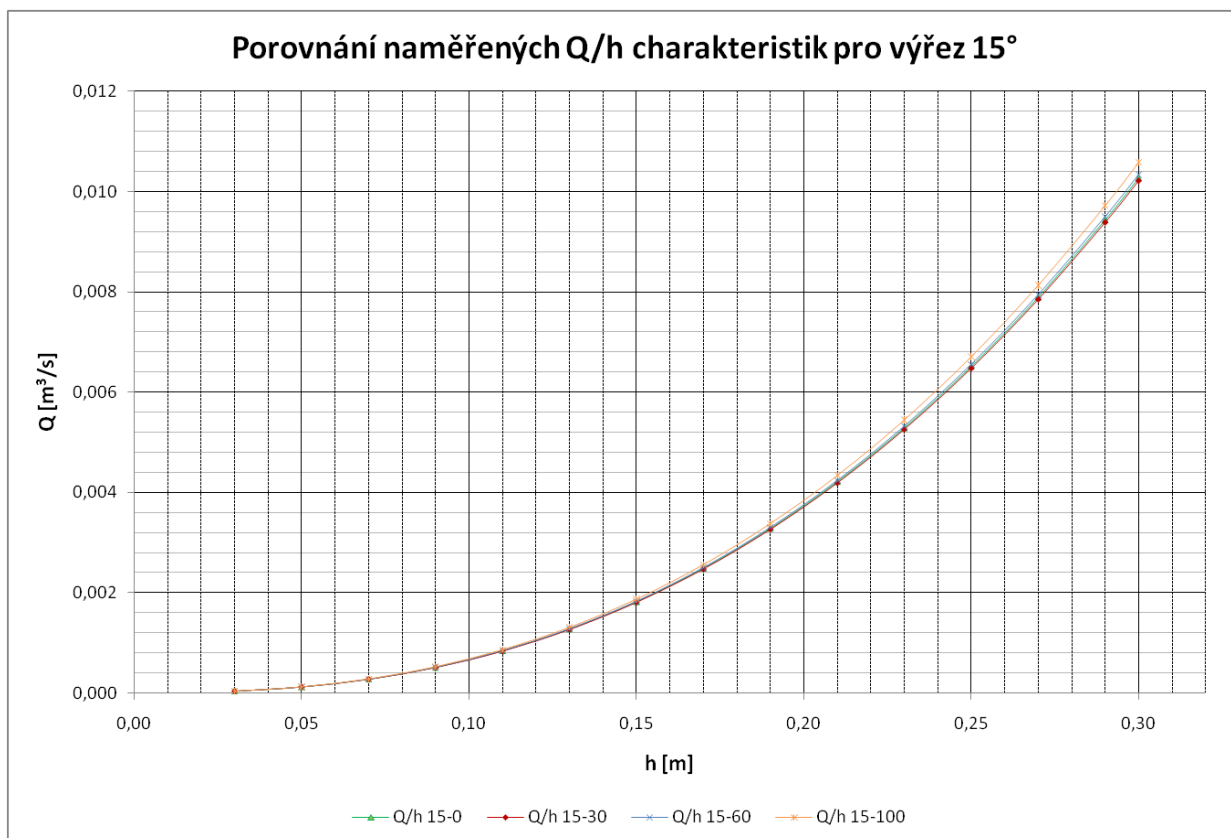
Grafické znázornění výsledné regrese je vyneseno v grafu 6. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,047 l/s.



Graf 6

6.5 Sjedení dat pro měrnou clonu s vrcholovým úhlem výřezu 15°

V předešlém textu jsme uvažovali nad každou Q/h charakteristikou samostatně, v dalším kroku této kapitoly jsme se proto zaměřili na vytvoření společné „univerzální“ Q/h charakteristiky pro měrnou clonu s úhlem výřezu 15°, která bude co nejlépe vystihovat všechna získaná (naměřená) data. Z grafu 7 je patrné, že data pro zkoumanou clonu o různých hodnotách p , jsou prakticky identická a nevykazují žádné velké odchylky.



Pro upřesnění velikostí vzájemných rozdílů jsou v tabulce 6 vyneseny dle vzorce 6.5 stanovené relativní procentuální odchylky jednotlivých Q/h charakteristik ke Q/h charakteristice měrné clony s označením 15°-0, pro zjednodušení jsou odchylky vyjádřeny podílem jednotlivých koeficientů C tedy:

$$\delta = \left(\frac{C_{15-30,60,100} - C_{15-0}}{C_{15-0}} \right) 100 \quad (6.5)$$

C_{15-30} k C_{15-0}	C_{15-60} k C_{15-0}	C_{15-100} k C_{15-0}
[%]	[%]	[%]
-0,67	0,56	2,92

Tabulka 6 Procentuální odchylky Q/h charakteristik k výřezu 15°-0

Vzájemné odchylky vztažené ke Q/h charakteristice 15°- 0 se pohybují v hodnotách maximálně do tří procent. Tato hodnota je poměrně vysoká, ale následnou regresí získanou průměrem ze všech dat se tato hodnota logicky výrazně sníží pod uvedenou mez.

Vzhledem ke značné podobnosti dosažených výsledků s malými odchylkami se mohla data sloučit. Postup pro stanovení výsledné regrese pro výřez 15° je obdobný jak v předchozích případech. Sjedením dat a následnou optimalizací koeficientu C získáme výslednou závislost průtoku na hloubce pro měrný přeliv o výřezu 15° tedy:

$$Q_{15}^R = 0,6729 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h^{2,5} \quad (6.6)$$

Jak bylo uvedeno v odstavci výše, po regresi všech dat, se hodnoty vzájemných odchylek jednotlivých Q/h charakteristik zmenšily (tabulka 7).

C_{15-0} k C_{15}	C_{15-30} k C_{15}	C_{15-60} k C_{15}	C_{15-100} k C_{15}
[%]	[%]	[%]	[%]
-0,32	-0,99	0,24	2,59

Tab. 7 Procentuální odchylky jednotlivých Q/h charakteristik k celkové Q/h charakteristice pro úhel výřezu 15°

Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je v tomto případě 0,0622 l/s. Pro porovnání získaných bodových odhadů směrodatných odchylek od Q/h je v tabulce 8 uveden kompletní přehled získaných hodnot.

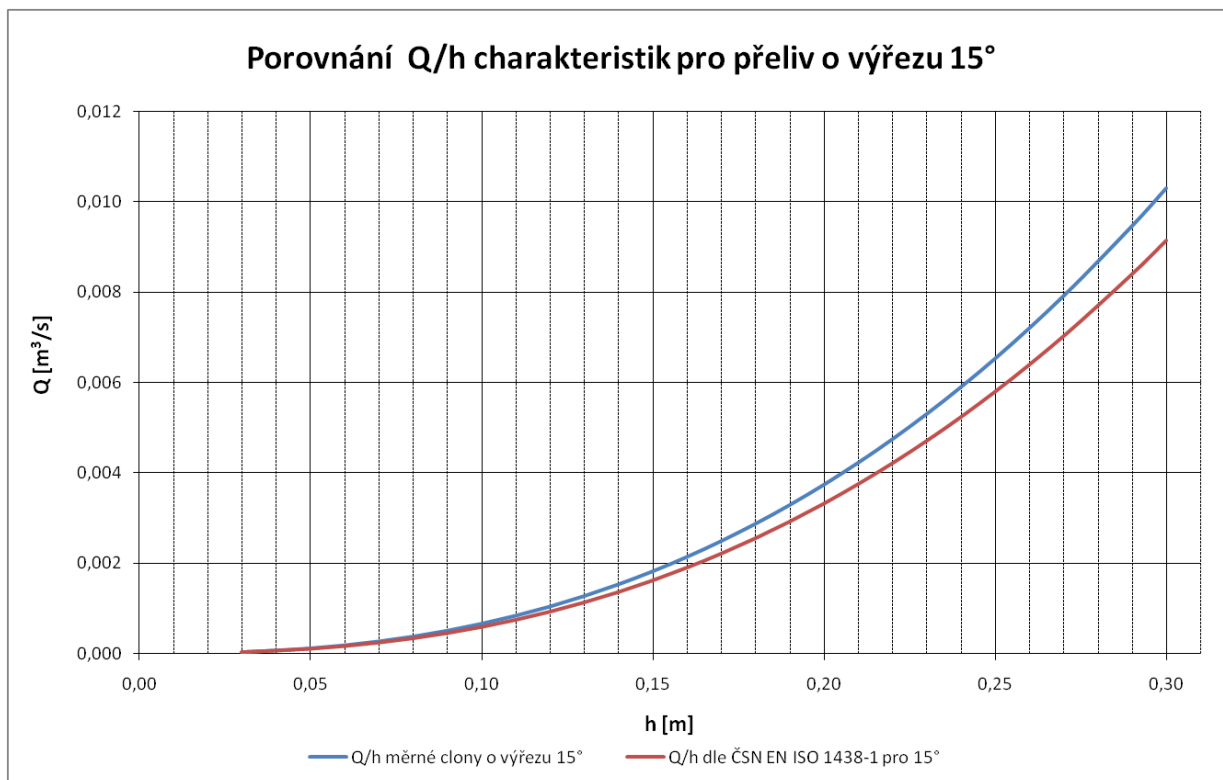
p	s
[mm]	[m ³ /s]
0	0,000111
30	0,000053
60	0,000051
100	0,000047
sjednocení	0,000062

Tab. 8 Porovnání bodových odhadů směrodatných odchylek od Q/h výřezu 15°

Lze vidět, že největší bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h vykazuje přeliv 15°-0 a nejmenší 15°-100.

6.6 Porovnání Q/h charakteristiky měrné clony o výřezu 15° se vztahy uvedenými v ČSN EN ISO 1438-1

V následujícím textu se zaměříme na porovnání námi získaných výsledků s Q/h charakteristikou dle ČSN EN ISO 1438-1.



Graf 8

Z grafu 8 je zřejmé, že měrná clona zkoušeného typu je více kapacitní, nežli přeliv se stejným úhlem výřezu, pro nějž je stanovena charakteristika ve smyslu ČSN EN ISO 1438-1, dána rovnicí 5.4. Dle poměru koeficientu C v rozsahu od 0,03 m po 0,3 m je procentuální odchylka definovaná vztahem (6.7) v celém rozsahu rovna 12,8%.

$$\delta = \left(\frac{C_{15} - C_{\text{ČSN } 15}}{C_{\text{ČSN } 15}} \right) 100 \quad (6.7)$$

Shodu s Q/h charakteristikou ČSN EN ISO 1438-1 nemůžeme očekávat, díky nedodržení zcela jiných okrajových podmínek uvedených v kapitole 2. V našem případě nebyla zajištěna dostatečná kontrakce proudu, a tím způsobena větší míra vlivu přítokové

rychlosti na získané výsledky. Proto v našem případě vykazuje měrná clona větší kapacitu než závislost stanovená dle normy.

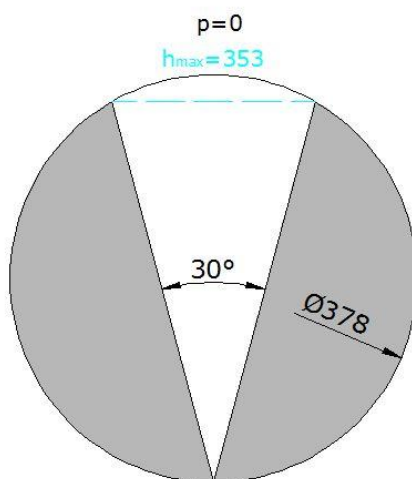
7 MĚRNÁ CLONA O VÝŘEZU 30°



Obr. 26 Měrná clona o výřezu 30°

Podobně jako v předchozí kapitole i zde v jednotlivých podkapitolách jsou uvedeny obrázky měrných clon, jejich rozměry, velikost úhlu a maximální možná přepadová výška. Ve výpočtové části jsou uvedeny opět naměřené hodnoty s jejich regresním odhadem, výsledná Q/h charakteristika i s grafickým vyjádřením a vypočítaný bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h .

7.1 Měrná clona 30° - 0



Obr. 27 Měrná clona 30° - 0

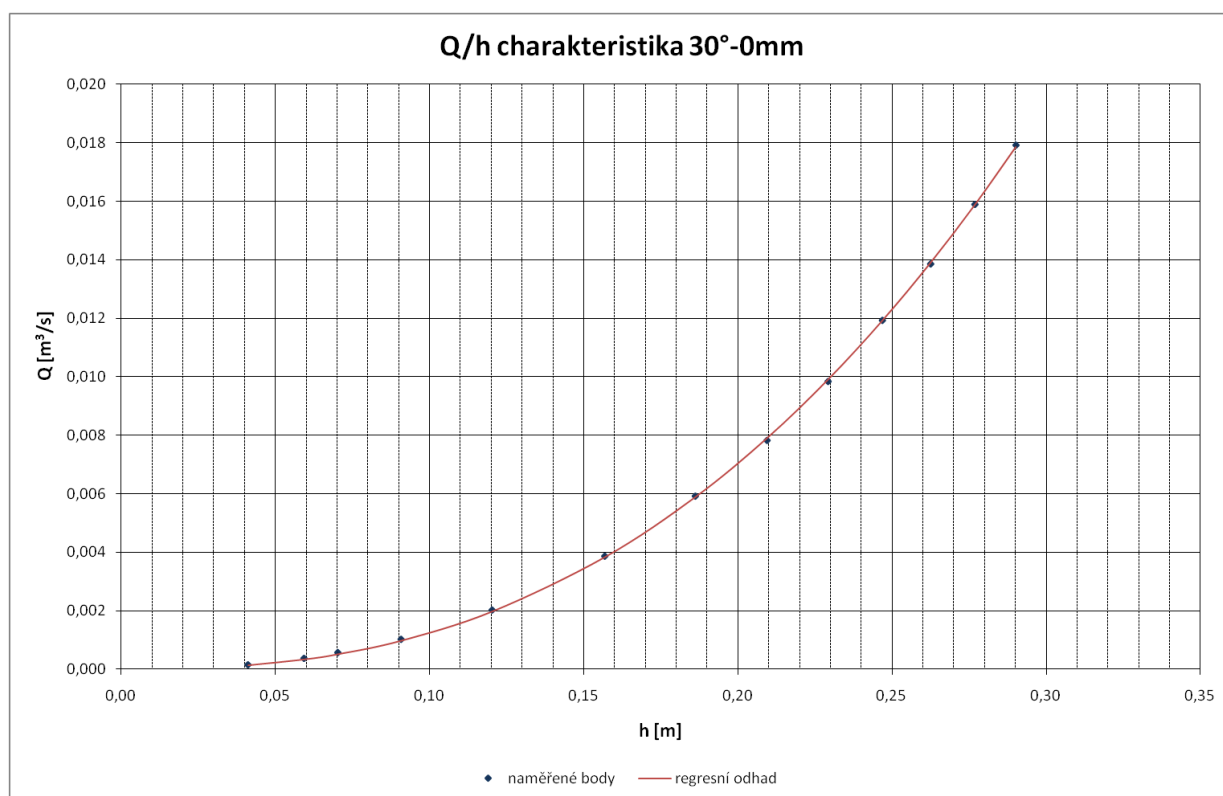
Obrázek 27 uvádí dispozice měrného přelivu. V tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty, které byly na tomto přelivu naměřeny, dále pak výpočet regresního odhadu a suma druhých mocnin rozdílů regresních odhadů od hodnot změřených (rovnice 5.1).

Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{30-0}	Q_{30-0}	Q_{30-0}^R	$(Q_{30-0} - Q_{30-0}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0411	0,00016	0,00013	6,41E-10
0,0592	0,00038	0,00034	1,92E-09
0,0702	0,00058	0,00051	3,90E-09
0,0908	0,00103	0,00098	2,88E-09
0,1203	0,00203	0,00197	3,17E-09
0,1568	0,00387	0,00383	1,47E-09
0,1862	0,00592	0,00589	1,22E-09
0,2094	0,00782	0,00790	5,72E-09
0,2292	0,00984	0,00990	4,20E-09
0,2469	0,01192	0,01191	8,82E-11
0,2625	0,01385	0,01389	1,93E-09
0,2769	0,01588	0,01587	1,14E-10
0,2902	0,01791	0,01785	3,14E-09
Σ			3,04E-08

Tab. 9 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 30° - 0

Výsledná Q/h charakteristika po optimalizaci koeficientu C pro 30° - 0 je tedy:

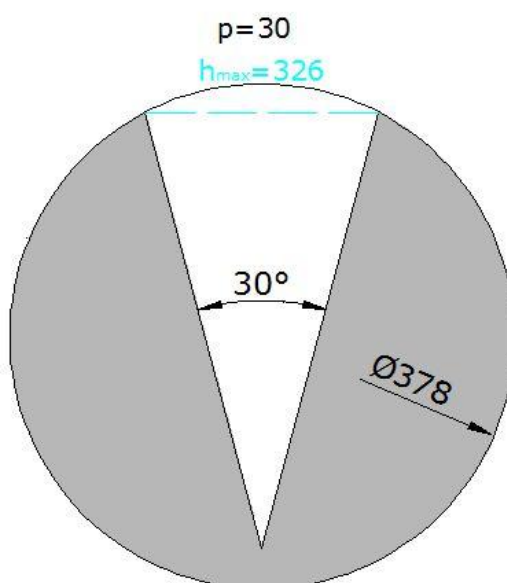
$$Q_{30-0}^R = 0,622 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (7.1)$$



Graf 9

V grafu 9 lze vidět maximální naměřený průtok 17,9 l/s při přepadové výšce 0,29 m a minimální hodnoty průtoku v tomto případě byly 0,16 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,0503 l/s.

7.2 Měrná clona 30° - 30



Obr. 28 Měrná clona 30° - 30

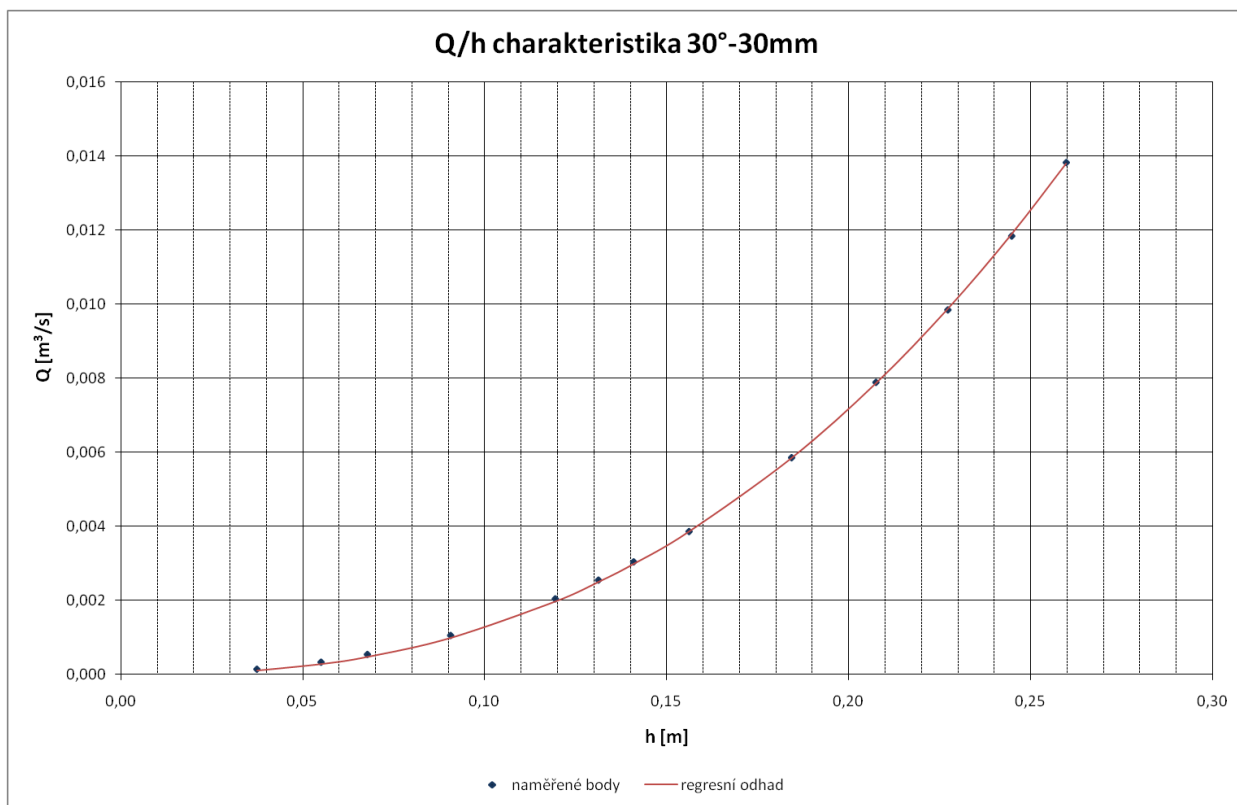
Rozměry tohoto typu přelivu jsou patrný z obrázku 28. Naměřené hodnoty a výpočet jejich regresního odhadu je uveden v tabulce 10.

Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{30-30}	Q_{30-30}	Q_{30-30}^R	$(Q_{30-30} - Q_{30-30}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0374	0,00013	0,00011	4,73E-10
0,0550	0,00032	0,00028	1,27E-09
0,0677	0,00053	0,00048	2,62E-09
0,0906	0,00104	0,00099	2,72E-09
0,1194	0,00203	0,00198	3,40E-09
0,1312	0,00254	0,00250	1,37E-09
0,1409	0,00303	0,00299	1,96E-09
0,1561	0,00385	0,00386	1,17E-10
0,1843	0,00585	0,00585	2,32E-12
0,2075	0,00789	0,00787	3,51E-10
0,2272	0,00985	0,00988	9,80E-10
0,2448	0,01184	0,01190	2,67E-09
0,2598	0,01383	0,01380	8,34E-10
Σ			1,88E-08

Tab. 10 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 30°- 30

Optimalizací koeficientů s podmínkou minimalizace sumy druhých mocnin rozdílů regresních odhadů jsme dospěli k výsledné Q/h charakteristice ve smyslu vzorce:

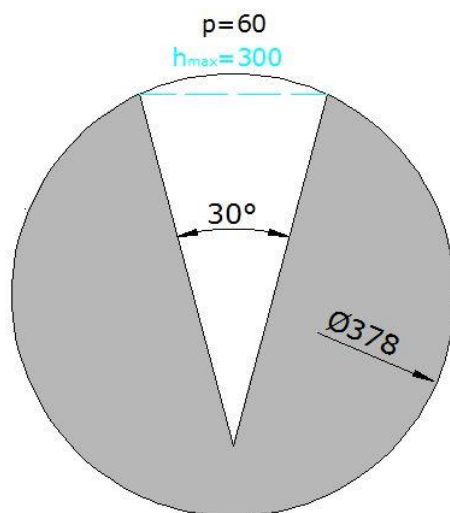
$$Q_{30-30}^R = 0,6343 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (7.2)$$



Graf 10

Výsledná regrese s naměřenými hodnotami je vyobrazena v grafu 10. Lze vidět třináct naměřených hodnot v rozmezí od 0,037 m po 0,26 m. V rozsahu průtoků od 0,1 l/s po 13,8 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,0395 l/s.

7.3 Měrná clona 30° - 60



Obr. 29 Měrná clona 30° - 60

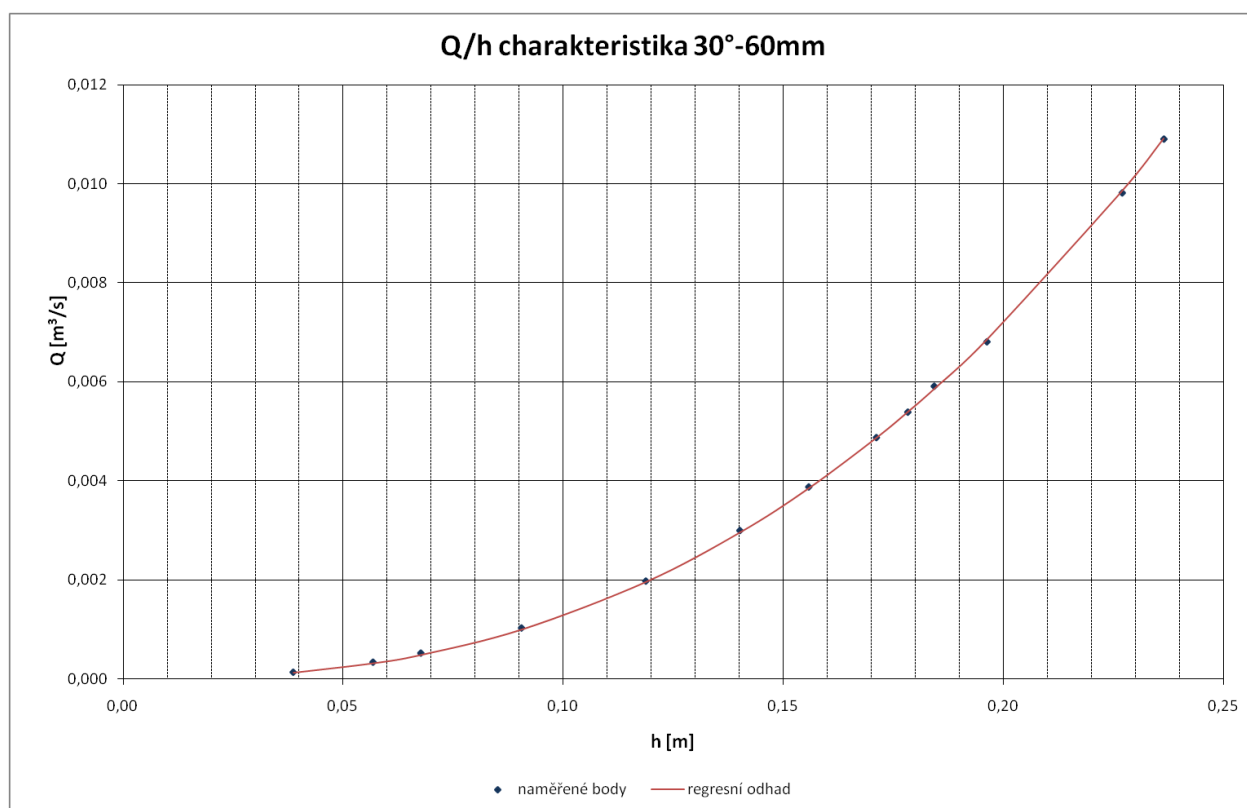
Přeliv tohoto typu byl přeměřen systematicky třinácti průtoky od 0,13 l/s po 13,8 l/s. Průtoky a k nim vztažené přepadové výšky jsou uvedeny v tabulce 11.

Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{30-60}	Q_{30-60}	Q_{30-60}^R	$(Q_{30-60} - Q_{30-60}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0387	0,00014	0,00012	3,37E-10
0,0569	0,00034	0,00031	9,53E-10
0,0677	0,00052	0,00048	2,00E-09
0,0906	0,00103	0,00099	1,58E-09
0,1188	0,00198	0,00195	6,23E-10
0,1402	0,00300	0,00295	2,02E-09
0,1558	0,00388	0,00384	1,02E-09
0,1712	0,00487	0,00486	1,08E-10
0,1783	0,00539	0,00539	1,49E-13
0,1843	0,00591	0,00585	3,40E-09
0,1963	0,00681	0,00685	1,75E-09
0,2270	0,00981	0,00985	1,35E-09
0,2365	0,01090	0,01091	1,17E-10
Σ			1,52E-08

Tab. 11 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 30°- 60

Jako u předešlých přelivů po optimalizaci koeficientů jsme dospěli k výsledné regresy ve smyslu vzorce:

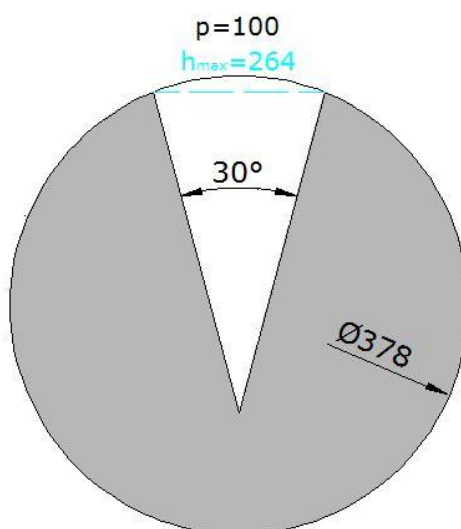
$$Q_{30-60}^R = 0,6341 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (7.3)$$



Graf 11

Výsledná regrese s naměřenými hodnotami je vyobrazena v grafu 11. Minimální průtok, který byl naměřen je 0,14 l/s při přepadové výšce 0,038 m. Naměřené maximum bylo při průtoku 11 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,0356 l/s.

7.4 Měrná clona 30° - 100



Obr. 30 Měrná clona 30° - 100

Na obrázku 30 vidíme dispoziční měrné clony s maximální výškou přelivu. V tabulce 12 jsou uvedeny naměřené hodnoty s výslednou regresí.

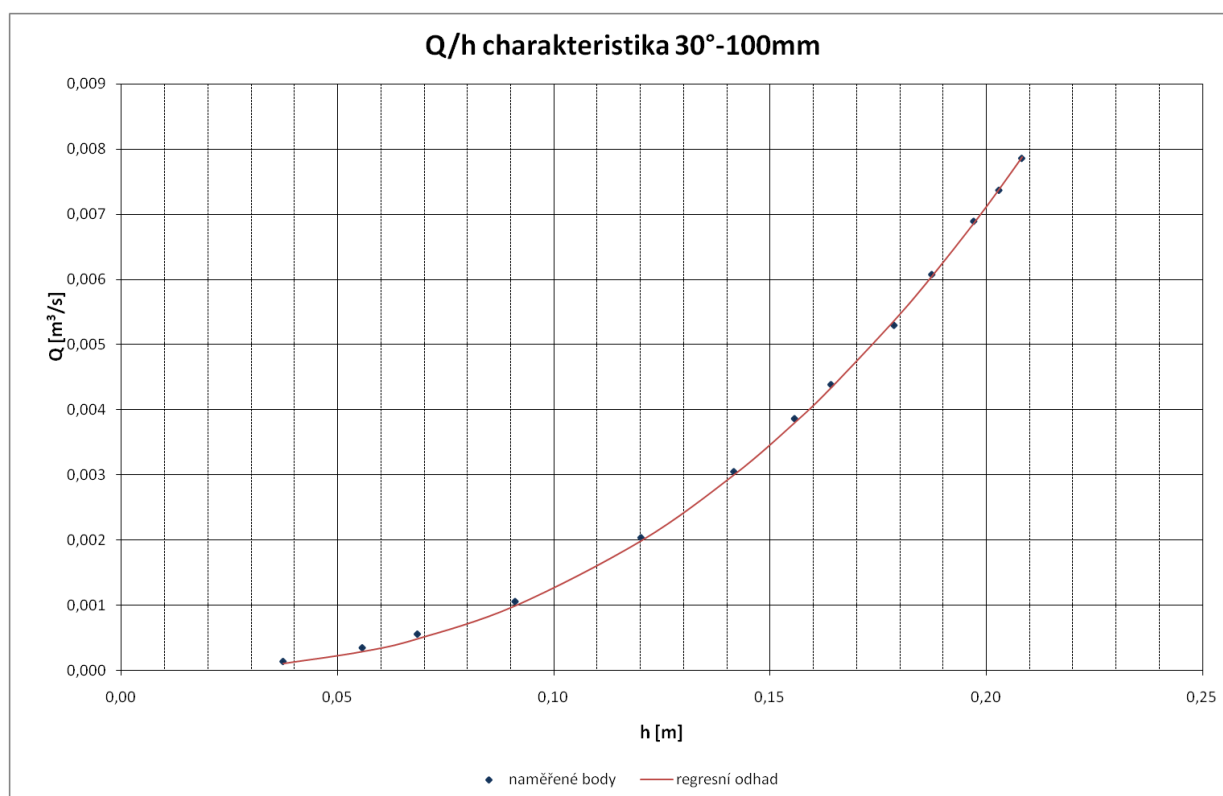
Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{30-100}	Q_{30-100}	Q_{30-100}^R	$(Q_{30-100} - Q_{30-100}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0373	0,00013	0,00011	5,18E-10
0,0557	0,00034	0,00029	2,40E-09
0,0684	0,00055	0,00049	3,94E-09
0,0910	0,00105	0,00100	3,01E-09
0,1202	0,00203	0,00199	1,41E-09
0,1417	0,00304	0,00301	1,42E-09
0,1557	0,00386	0,00381	2,41E-09
0,1641	0,00438	0,00434	1,26E-09
0,1787	0,00529	0,00537	7,04E-09
0,1875	0,00607	0,00606	2,02E-10
0,1972	0,00689	0,00687	2,83E-10
0,2030	0,00736	0,00739	6,13E-10
0,2083	0,00785	0,00788	6,38E-10
Σ			2,51E-08

Tab. 12 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 30°- 100

Optimalizací koeficientu C jsme získali Q/h charakteristiku:

$$Q_{30-100}^R = 0,6291 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (7.4)$$

Tuto závislost jsme zobrazili v grafu 12. Lze vidět, že měrný rozsah tohoto typu přelivu není moc velký, začíná na hodnotě přepadové výšky 0,037 m a končí v hodnotě 0,21 m při průtoku 7,9 l/s.

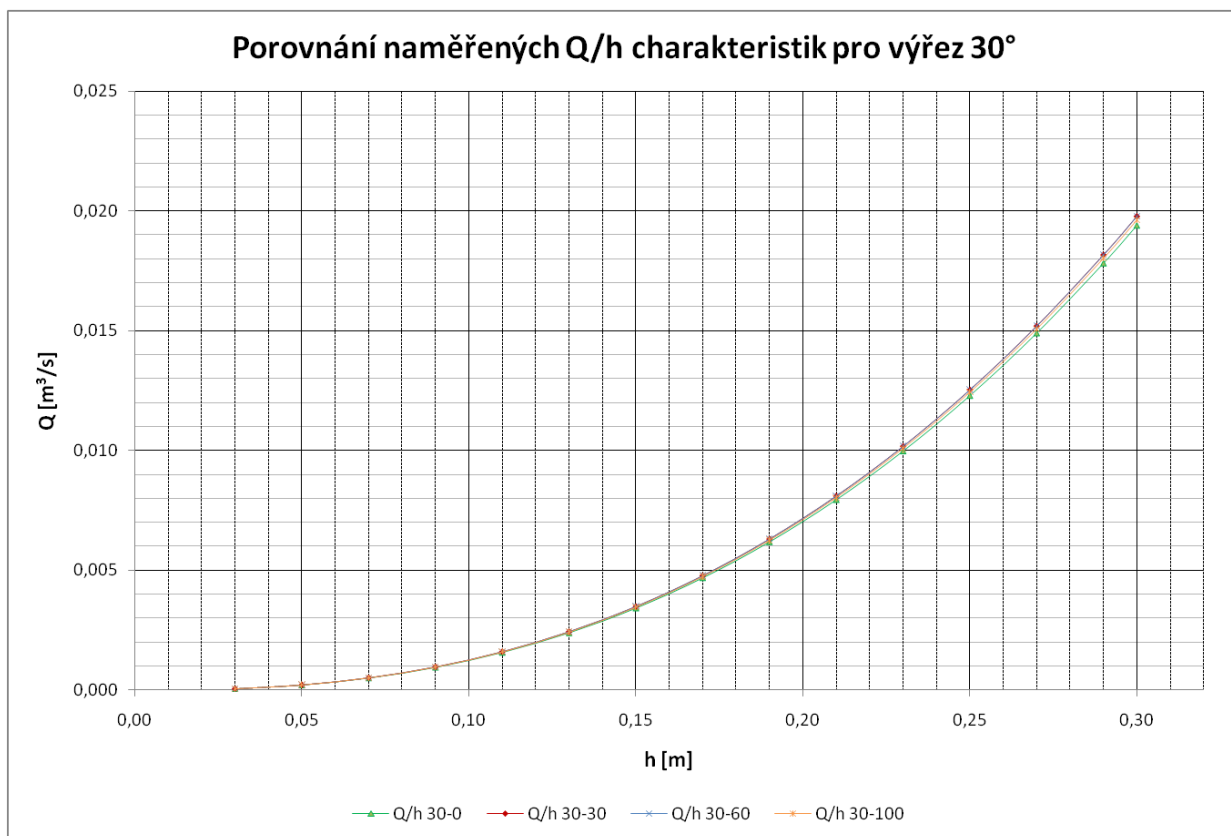


Graf 12

Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,0457 l/s.

7.5 Sjedení dat pro měrnou clonu s vrcholovým úhlem výřezu 30°

Pro vytvoření univerzální Q/h charakteristiky pro výřez 30° jsme postupovali podobně jako u předchozí clony. Nejprve jsme porovnali výsledné Q/h charakteristiky mezi sebou. V grafu 13 lze vidět že Q/h charakteristiky jsou si velmi podobné, proto jsme v tabulce 13, dle závislosti 7.5, vynesli jejich vzájemné odchylky vztažené k nulové svislé odlehlosti vrcholu výřezu ode dna.



$$\delta = \left(\frac{c_{30-30,60,100} - c_{30-0}}{c_{30-0}} \right) 100 \quad (7.5)$$

Q/h ₃₀₋₃₀ ke Q/h ₃₀₋₀	Q/h ₃₀₋₆₀ ke Q/h ₃₀₋₀	Q/h ₃₀₋₁₀₀ ke Q/h ₃₀₋₀
[%]	[%]	[%]
1,97	1,94	1,14

Tab. 13 Procentuální odchylky Q/h charakteristik k výřezu 30°-0

V tabulce 13 je zřejmé že odchylky vztažené ke Q/h charakteristice 30°-0 se pohybují v hodnotách maximálně do 2%.

Díky malým odchylkám a značné podobnosti dosažených výsledků se mohla data sloučit. Postup pro stanovení výsledné regrese pro výřez 30° je obdobný jak v předchozích případech. Došlo ke sjednocení dat, k vypočítání koeficientu C a následně stanovení výsledné Q/h charakteristiky pro měrnou clonu o výřezu 30° ve smyslu vzorce:

$$Q_{30}^R = 0,6277 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h^{2,5} \quad (7.6)$$

Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,0745 l/s .

Pro srovnání dosaženého výsledku vůči předešlým závislostem jsou v tabulce 14 vypočítány odchylky ke Q/h charakteristice, kterou jsme získali sloučením dat. Díky regresi všech dat, se hodnoty vzájemných odchylek jednotlivých Q/h charakteristik zmenšily.

Q/h_{30-0} ke Q/h_{30}	Q/h_{30-30} ke Q/h_{30}	Q/h_{30-60} ke Q/h_{30}	Q/h_{30-100} ke Q/h_{30}
[%]	[%]	[%]	[%]
-0,90	1,06	1,02	0,23

Tab. 14 Procentuální odchylky jednotlivých Q/h charakteristik k celkové Q/h charakteristice výřezu 30°

V další tabulce 15 jsou uvedeny pro porovnání bodové odhady směrodatných odchylek od Q/h pro všechny varianty měrné clony o výřezu 30°.

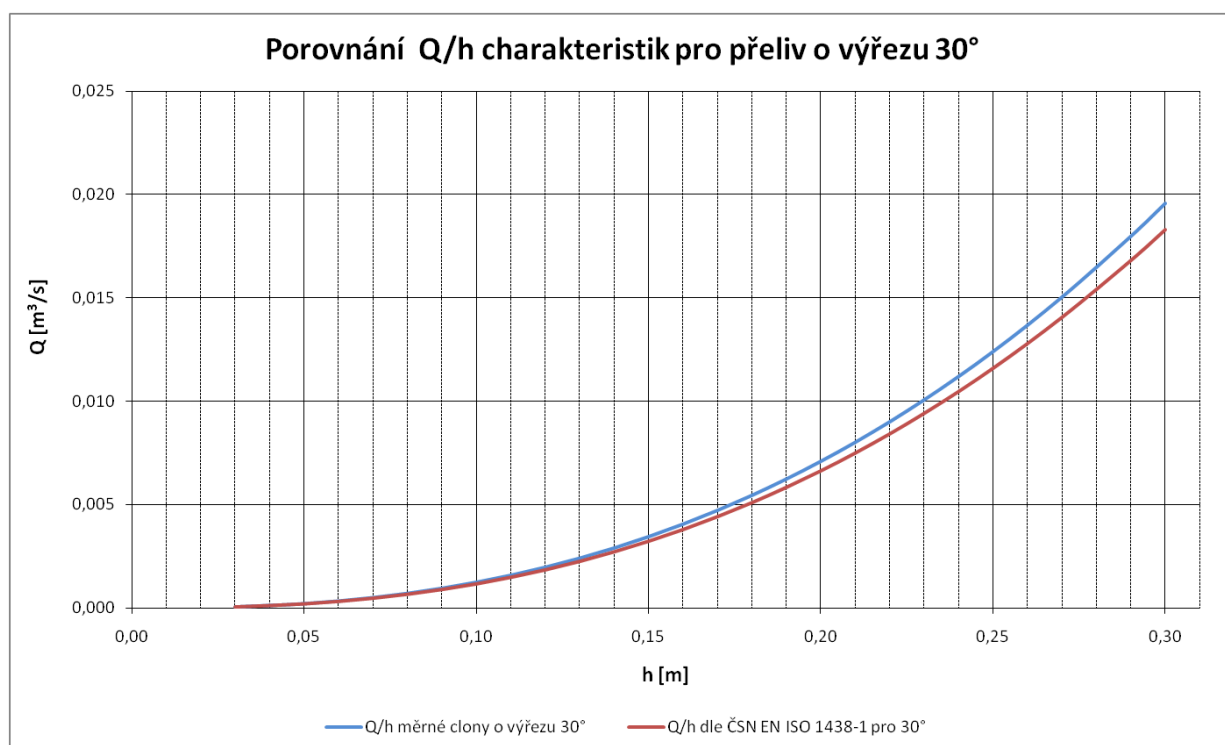
p	s
[mm]	[m ³ /s]
0	0,000050
30	0,000040
60	0,000036
100	0,000046
sjednocení	0,000075

Tab. 15 Porovnání bodových odhadů směrodatných odchylek od Q/h výřezu 30°

Lze vidět, že největší bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h vykazuje regrese vzniklá sloučením dat ze všech měření a nejmenší přeliv o výřezu 30°-60.

7.6 Porovnání Q/h charakteristiky měrné clony o výřezu 30° se vztahy uvedenými v ČSN EN ISO 1438-1

Cílem této analýzy je vzájemné posouzení výsledků. Tedy porovnat závislost definovanou vztahem 5.5 s námi získanou závislostí 7.6.



Graf 14

V grafu 14 máme vyneseny obě Q/h charakteristiky. Na první pohled je patrné že měrná clona s výřezem 30° je více kapacitní nežli Q/h charakteristika uvedená v ČSN EN ISO 1438-1 . Výsledný procentuální rozdíl v tomto případě při rozsahu přepadové výšky od 0,03 m po 0,3 m je necelých 7 %, tedy je menší než v případě měrné clony o výřezu 15°. Odchylka byla stanovena ve smyslu vzorce:

$$\delta = \left(\frac{c_{30} - c_{\text{ČSN}30}}{c_{\text{ČSN}30}} \right) 100 \quad (7.7)$$

I u tohoto typu měrné clony nebyla zajištěna dostatečná kontrakce proudu. Vliv přítokové rychlosti tak má za následek, že měrná clona má větší kapacitu než závislost uvedená normou.

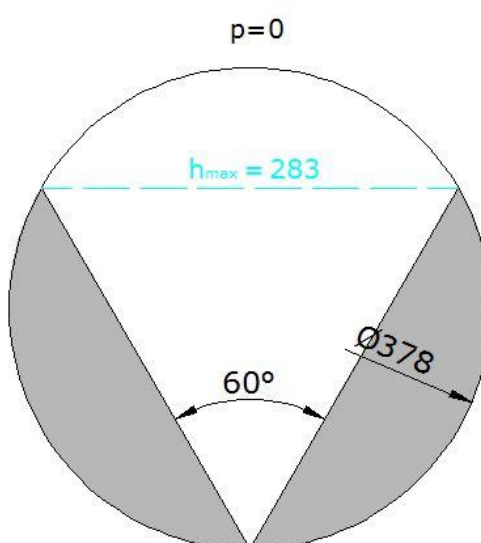
8 MĚRNÁ CLONA O VÝŘEZU 60°



Obr. 31 Měrná clona o výřezu 60°

V případě poslední clony 60° byl výzkum proveden stejně jako v předchozích dvou případech. Ve čtyřech podkapitolách jsou uvedeny geometrické vlastnosti měrných clon o různých svislých odlehlostech. Ke každé měrné cloně jsou uvedeny naměřené hodnoty, regresní odhad, výsledná Q/h charakteristika, grafické vyjádření a vypočítaný bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h .

8.1 Měrná clona 60° - 0



Obr. 32 Měrná clona 60° - 0

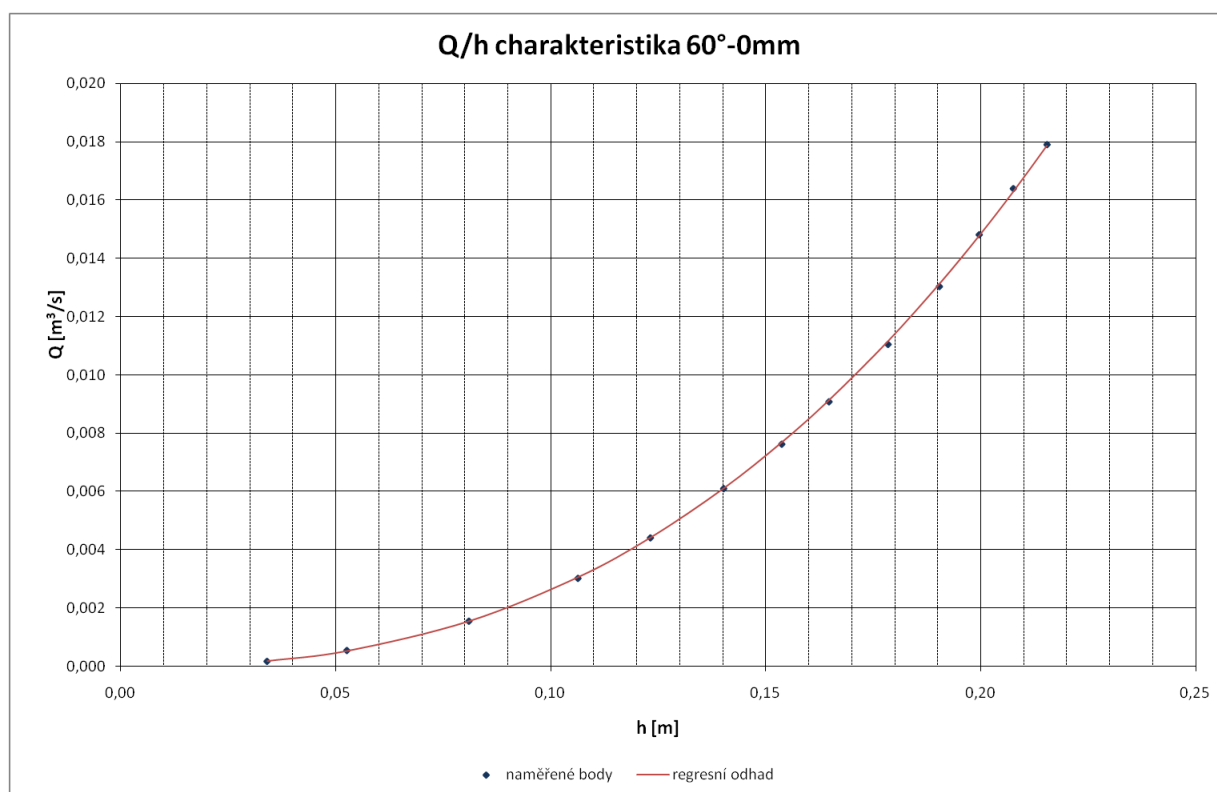
Na obrázku 32 můžeme vidět dispozice tohoto typu přelivu. V tabulce 16 jsou uvedeny naměřené hodnoty s vypočítaným regresním odhadem.

Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{60-0}	Q_{60-0}	Q_{60-0}^R	$(Q_{60-0} - Q_{60-0}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0340	0,00016	0,00018	1,82E-10
0,0526	0,00054	0,00053	1,21E-10
0,0809	0,00154	0,00155	8,51E-12
0,1063	0,00301	0,00306	1,84E-09
0,1232	0,00440	0,00441	1,35E-10
0,1402	0,00609	0,00610	9,51E-11
0,1537	0,00762	0,00768	3,93E-09
0,1647	0,00908	0,00913	2,70E-09
0,1784	0,01105	0,01115	1,15E-08
0,1904	0,01303	0,01311	6,35E-09
0,1996	0,01481	0,01477	2,20E-09
0,2076	0,01640	0,01628	1,42E-08
0,2154	0,01791	0,01786	2,06E-09
Σ			4,53E-08

Tab. 16 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 60° - 0

Výsledná Q/h charakteristika po optimalizaci koeficientu C pro 60° - 0 je tedy:

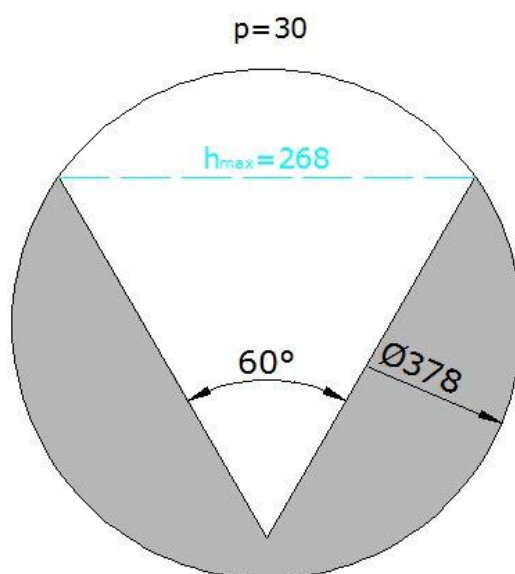
$$Q_{60-0}^R = 0,6085 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (8.1)$$



Graf 15

V grafu 15 lze vidět třináct proměřených průtoků v rozsahu přepadové výšky od 0,034 m po 0,22 m. Tedy maximální naměřený průtok byl v tomto případě 17,9 l/s a minimální průtok byl 0,16 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h je roven 0,0615 l/s.

8.2 Měrná clona 60° - 30



Obr. 33 Měrná clona 60°-30

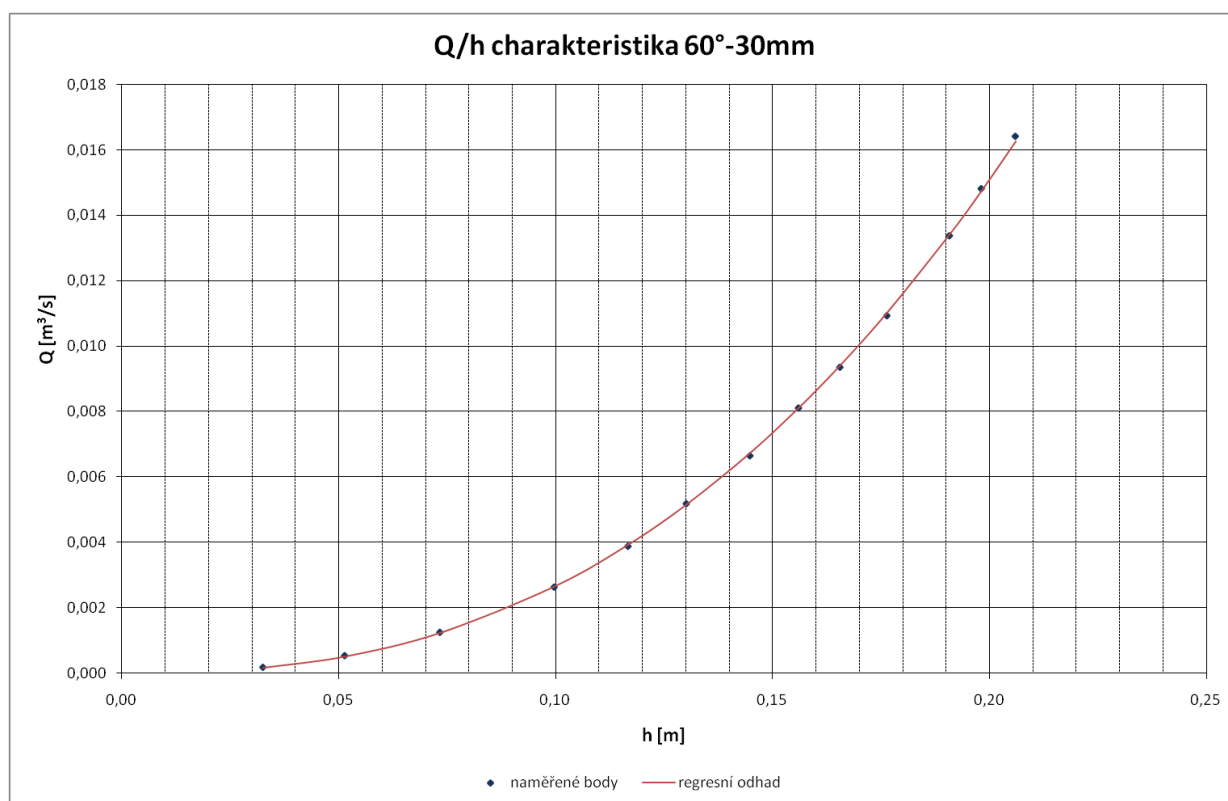
Rozměry přelivu 60°- 30 jsou patrný z obrázku 33. V tabulce 17 je znázorněno třináct naměřených hodnot s vypočítanými regresními odhady.

Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{60-30}	Q_{60-30}	Q_{60-30}^R	$(Q_{60-30} - Q_{60-30}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0326	0,00017	0,00016	6,59E-11
0,0514	0,00053	0,00051	4,16E-10
0,0734	0,00124	0,00123	7,25E-11
0,0997	0,00262	0,00265	7,39E-10
0,1167	0,00387	0,00393	3,26E-09
0,1302	0,00518	0,00516	2,35E-10
0,1448	0,00664	0,00674	9,33E-09
0,1560	0,00810	0,00812	2,47E-10
0,1656	0,00935	0,00942	4,19E-09
0,1764	0,01093	0,01103	1,09E-08
0,1908	0,01338	0,01343	2,80E-09
0,1982	0,01482	0,01476	3,60E-09
0,2060	0,01642	0,01626	2,48E-08
Σ			6,07E-08

Tab. 17 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 60°- 30

Optimalizací koeficientů s podmínkou minimalizace sumy druhých mocnin rozdílů regresních odhadů jsme dospěli k výsledné Q/h charakteristice ve smyslu vzorce.

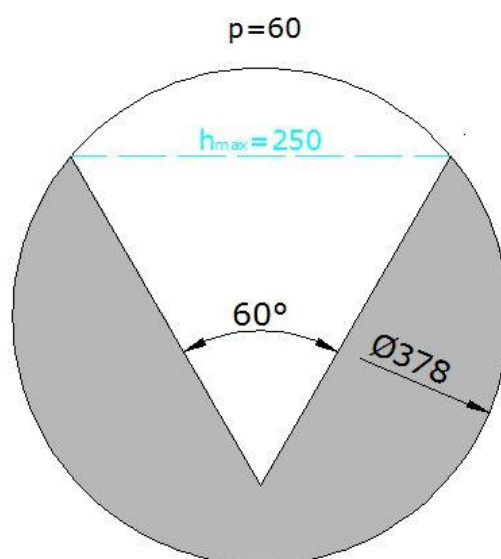
$$Q_{60-30}^R = 0,6194 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (8.2)$$



Graf 16

Výsledná regrese s naměřenými hodnotami je vyobrazena v grafu 16. Rozsah hodnot je v tomto případě od 0,17 l/s po 16,4 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h na 68% hladině spolehlivosti je roven v tomto případě 0,0711 l/s.

8.3 Měrná clona 60° - 60



Obr. 34 Měrná clona 60°-60

V geometrickém znázornění (obrázek 34) měrné clony o výřezu 60° - 60, lze vidět dispozice tohoto přelivu. Tato měrná clona byla systematicky prozkoumána třinácti průtoky uvedenými v tabulce 18. Pro každý průtok byl stanoven regresní odhad za pomoci optimalizace koeficientu C .

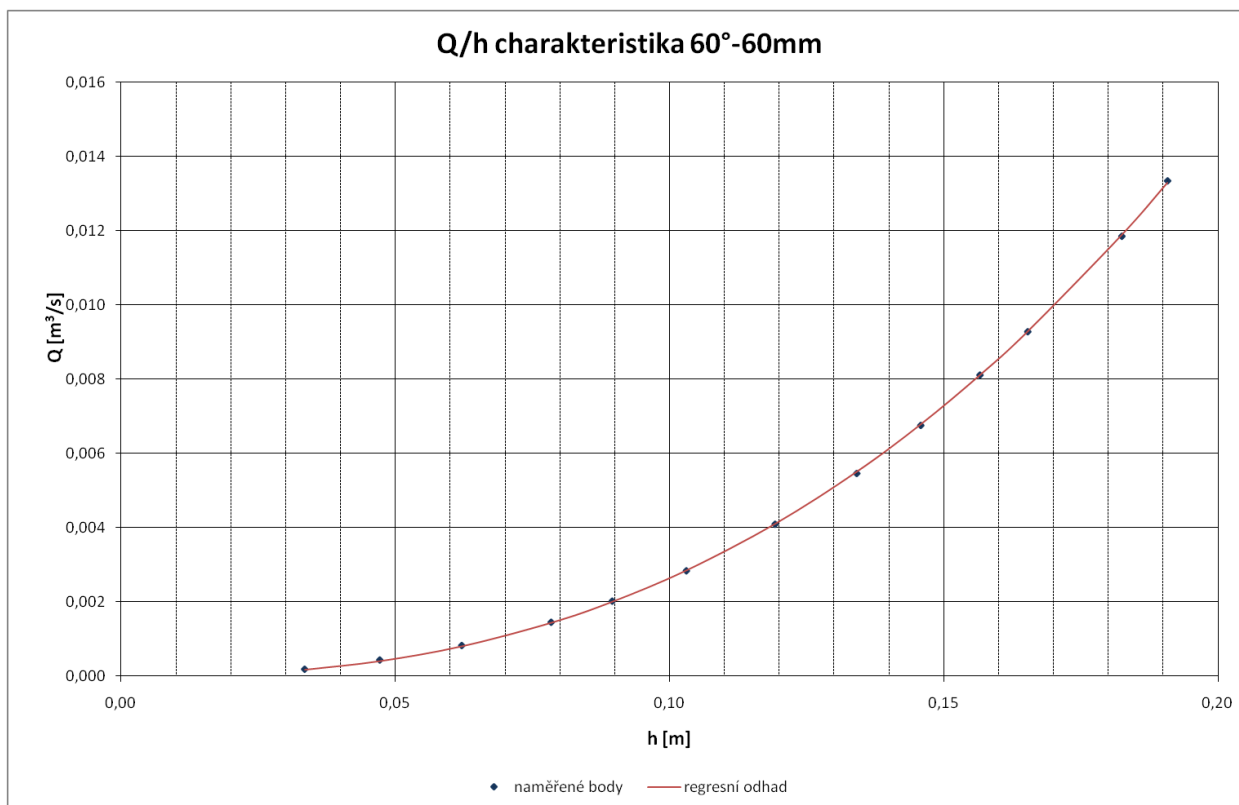
Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{60-60}	Q_{60-60}	Q_{60-60}^R	$(Q_{60-60} - Q_{60-60}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0334	0,00018	0,00017	8,27E-11
0,0471	0,00043	0,00040	7,06E-10
0,0621	0,00082	0,00080	2,97E-10
0,0784	0,00145	0,00144	7,47E-11
0,0895	0,00202	0,00200	1,48E-10
0,1030	0,00283	0,00285	2,44E-10
0,1192	0,00409	0,00410	1,56E-10
0,1341	0,00546	0,00551	2,11E-09
0,1458	0,00676	0,00678	6,77E-10
0,1566	0,00811	0,00811	2,08E-11
0,1653	0,00928	0,00929	4,34E-12
0,1824	0,01186	0,01189	8,15E-10
0,1908	0,01335	0,01329	3,48E-09
Σ			8,82E-09

Tab. 18 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 60°- 60

Výsledná regrese byla stanovena ve smyslu vzorce:

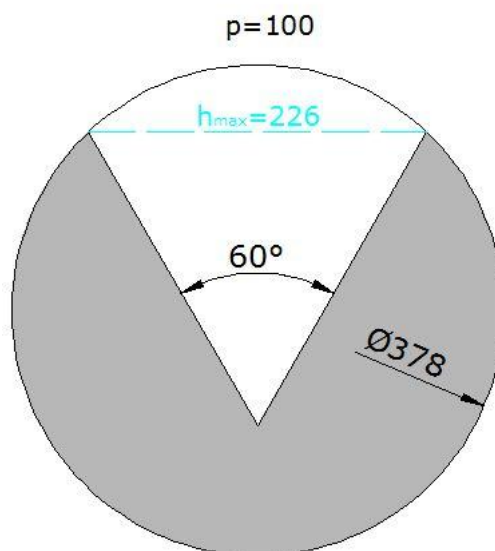
$$Q_{60-60}^R = 0,6133 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (8.3)$$

A její grafické znázornění můžeme vidět na grafu 17. Rozsah měření byl od 0,033 m po 0,19 m. Při průtocích od 0,18 l/s po 13,3 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h na 68% hladině spolehlivosti je roven 0,0271 l/s.



Graf 17

8.4 Měrná clona 60° - 100



Obr. 35 Měrná clona 60°-100

Na obrázku 35, jsou znázorněny geometrické vlastnosti měrné clony 60°-100. V tabulce 19 jsou uvedeny naměřené hodnoty s výslednou regresí.

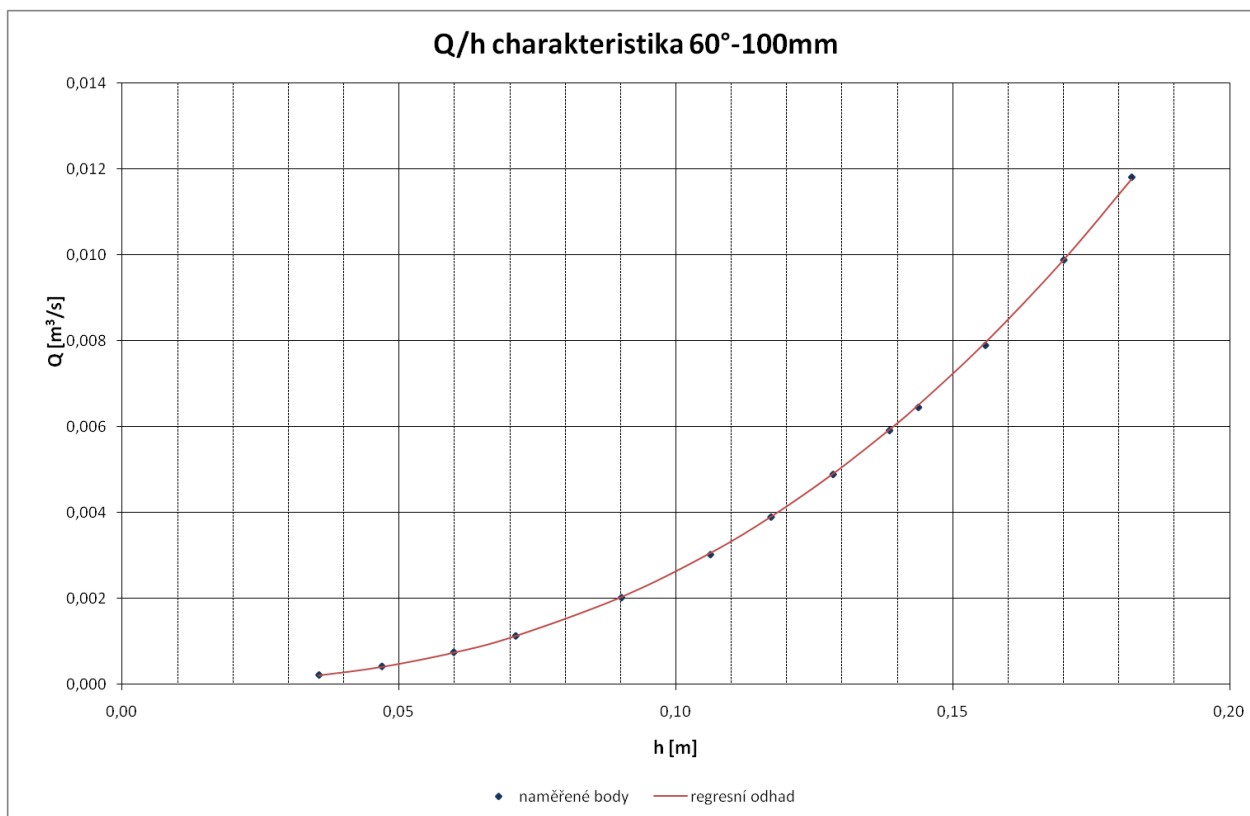
Naměřené hodnoty		Výpočet	
h_{60-100}	Q_{60-100}	Q_{60-100}^R	$(Q_{60-100} - Q_{60-100}^R)^2$
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
0,0355	0,00021	0,00020	1,71E-10
0,0469	0,00041	0,00039	2,47E-10
0,0598	0,00074	0,00073	2,00E-10
0,0710	0,00112	0,00111	2,86E-11
0,0901	0,00201	0,00202	6,45E-11
0,1062	0,00302	0,00305	8,38E-10
0,1171	0,00389	0,00389	3,45E-13
0,1284	0,00489	0,00489	2,11E-11
0,1385	0,00591	0,00592	9,18E-11
0,1437	0,00645	0,00649	1,79E-09
0,1558	0,00790	0,00795	2,40E-09
0,1700	0,00989	0,00988	1,17E-10
0,1823	0,01182	0,01176	3,68E-09
Σ			9,65E-09

Tab. 19 Přehled naměřených a odhadnutých průtoků metodou nejmenších čtverců pro přeliv typu 60°- 100

Optimalizací koeficientu C jsme získali Q/h charakteristiku:

$$Q_{60-100}^R = 0,608 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h_i^{2,5} \quad (8.4)$$

Tuto závislost jsme zobrazili v grafu 18. Lze vidět, že měrný rozsah tohoto typu přelivu není moc velký, začíná na hodnotě přepadové výšky 0,0355 m a končí v hodnotě 0,182 m při průtoku 11,8 l/s.

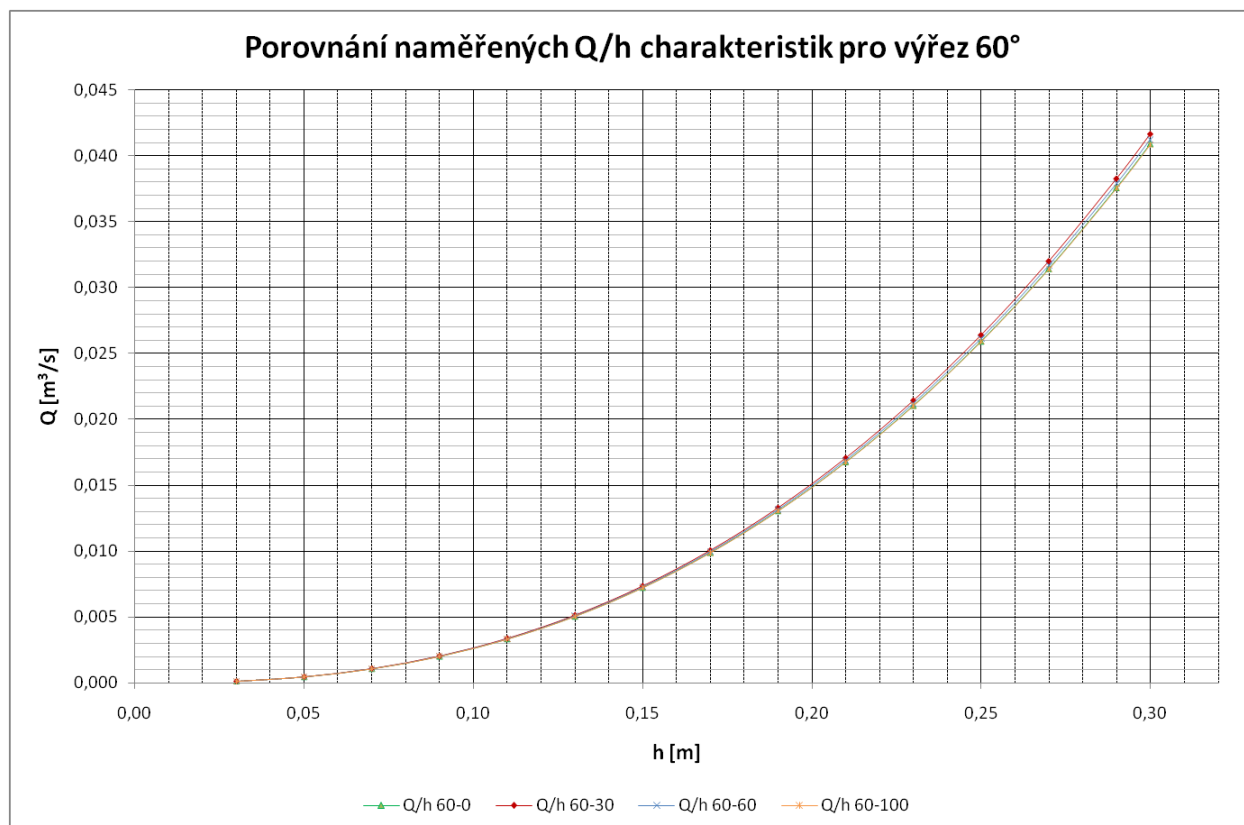


Graf 18

Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h na 68% hladině spolehlivosti je roven 0,0284 l/s.

8.5 Sjedení dat pro měrnou clonu s vrcholovým úhlem výřezu 60°

Jako v předešlých dvou případech, tak i u měrné clony o výřezu 60° došlo k porovnání v grafu 19 jednotlivých Q/h charakteristik o různých svislých odlehlostech vrcholu výřezu ode dna. I v tomto případě nedochází k žádným velkým odchylkám mezi jednotlivými typy clon. V tabulce 20 můžeme vidět, že odchylky se pohybují v rozmezí od -0,08% po 1,8%. Opět jsou odchylky počítány ze vzájemného podílu koeficientů C dle vzorce 8.4.



Graf 19

$$\delta = \left(\frac{c_{60-30,60,100} - c_{60-0}}{c_{60-0}} \right) 100 \quad (8.5)$$

Q/h ₆₀₋₃₀ ke Q/h ₆₀₋₀	Q/h ₆₀₋₆₀ ke Q/h ₆₀₋₀	Q/h ₆₀₋₁₀₀ ke Q/h ₆₀₋₀
[%]	[%]	[%]
1,79	0,79	-0,08

Tabulka 20 Procentuální odchylky Q/h charakteristik k výřezu 60°-0

Clony o výřezu 30° a 15° vykazovaly vyšší odchylky jak tento typ měrné clony o výřezu 60°. Proto i v tomto případě muselo dojít ke sloučení hodnot, které byly naměřeny. Za pomoci optimalizace koeficientu C se stanovila výsledná regrese měrné clony o výřezu 60°

$$Q_{60}^R = 0,6126 \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(tg \frac{\alpha}{2} \right) h^{2,5} \quad (8.6)$$

Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h o výřezu 60° na hladině spolehlivosti 68% má hodnotu 0,0808 l/s.

Pro srovnání dosaženého výsledku vůči předešlým závislostem jsou v tabulce 21 vypočítány odchylky jednotlivých Q/h charakteristik o různých svislých odlehlostech k regresi, kterou jsme získali sloučením dat. Díky regresi všech dat, se hodnoty vzájemných odchylek jednotlivých Q/h charakteristik zmenšily.

Q/h_{60-0} ke Q/h_{60}	Q/h_{60-30} ke Q/h_{60}	Q/h_{60-60} ke Q/h_{60}	Q/h_{60-100} ke Q/h_{60}
[%]	[%]	[%]	[%]
-0,66	1,12	0,12	-0,74

Tab. 21 Procentuální odchylky jednotlivých Q/h charakteristik k celkové Q/h charakteristice výřezu 60°

V další tabulce 22 jsou uvedeny pro porovnání bodové odhady směrodatných odchylek od Q/h pro všechny varianty měrné clony o výřezu 60° .

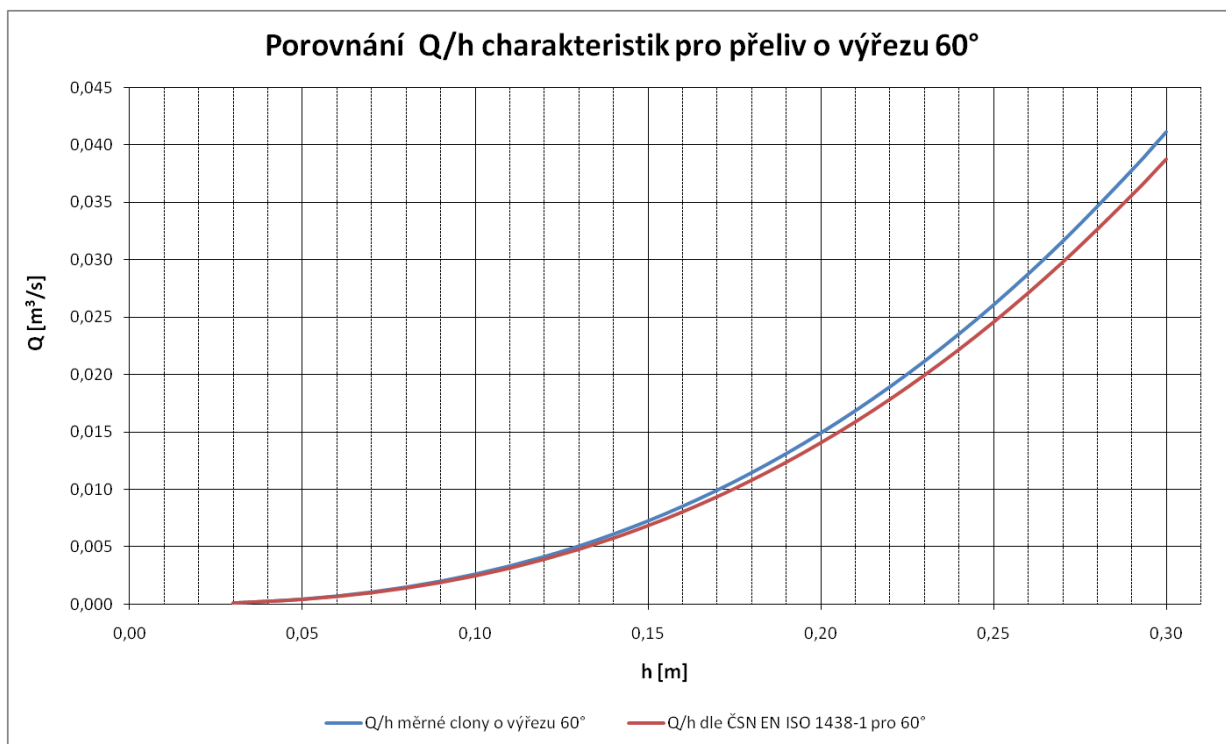
p	s
[mm]	[m ³ /s]
0	0,000061
30	0,000071
60	0,000027
100	0,000028
sjednocení	0,000081

Tab. 22 Porovnání bodových odhadů směrodatných odchylek od Q/h výřezu 60°

Lze vidět, že největší bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h vykazuje regrese vzniklá sloučením dat ze všech měření a nejmenší přeliv o výřezu 60° -60.

8.6 Porovnání Q/h charakteristiky měrné clony o výřezu 60° se vztahy uvedenými v ČSN EN ISO 1438-1

Jako další krok vyhodnocení výsledku je porovnání výsledné Q/h charakteristiky ve smyslu vzorce 8.6 s Q/h charakteristikou, která je dána ČSN EN ISO 1438-1 (závislost 5.6). Pro představu jsou jednotlivé charakteristiky vyneseny do grafu 20.



Ve smyslu vzorce 8.7, byla stanovena odchylka těchto dvou křivek a její hodnota je nejmenší ze všech tří variant měrných clon. Odchylka je 6,3 %.

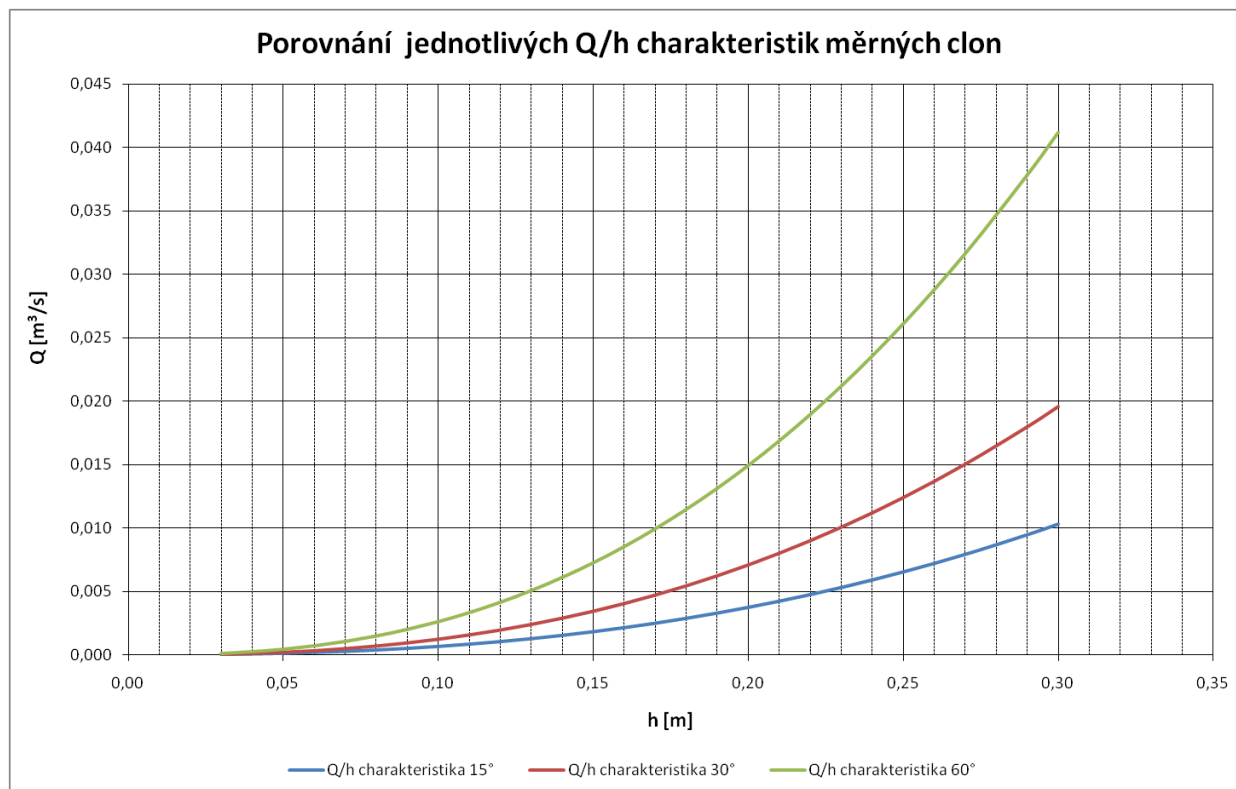
$$\delta = \left(\frac{c_{60} - c_{\text{ČSN } 60}}{c_{\text{ČSN } 60}} \right) 100 \quad (8.7)$$

V tomto případě se regresní křivka clony 60° nejvíce přibližuje popisu Q/h charakteristiky ČSN EN ISO 1438-1, ale opět větší kapacitu přelivu způsobuje nedodržení okrajových podmínek uvedených v [1]. Díky nesplnění podmínek úplné kontrakce je opět vliv přítokové rychlosti vyšší a způsobuje zvětšení kapacity měrné clony o výřezu 60° oproti údajům z normy.

9 POROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH Q/h CHARAKTETISTIK JEDNOTLIVÝCH MĚRNÝCH CLON

Z předešlé kapitoly je zřejmé že výsledné Q/h charakteristiky z hlediska věcné přesnosti nejsou závislé na svislé odlehlosti měrné clony ode dna. Pro celkovou představu o

výsledcích našeho měření jsme získané „univerzální“ regrese, pro všechny tři typy (úhly 15°, 30°, 60°) měrných clon, vynesli do grafu 21. Vzhledem k rozsahu měření, jsou regrese vyneseny pro přepadovou výšku od 0,03 m po maximální hodnotu 0,3 m, kterou jsme byli schopni při zkouškách dosáhnout. V dalších kapitolách tento rozsah zvětšíme, díky přepočtu jednotlivých regresí na větší průměry potrubí. Rozpětí přepadové výšky bude odpovídat jejímu maximálnímu rozsahu pro příslušný průměr potrubí až do hodnoty DN 1500.



Graf 21

Z grafu 21 je patrné, že nejvíce kapacitní je clona o výřezu 60°, následuje clona o výřezu 30° a nejmenší kapacitu má clona o výřezu 15°. Rozdíl kapacity mezi těmito měrnými clonami je nejvíce patrný při přepadové výšce 0,3 m, kdy clona o výřezu 15° převede průtok maximálně 10 l/s v případě clony o výřezu 30° je to 20 l/s a největší hodnoty nabývá clona o výřezu 60°, která je schopná převést průtok přes 40 l/s. Citlivost jednotlivých clon na změnu průtoku je dána strmostí jejich Q/h charakteristik, nejvíce citlivá je tak clona o výřezu 15°.

9.1 Přesnost odhadu regresní funkce

Jak je uvedeno v [8] v praktických aplikacích často určujeme odhad příslušného parametru pomocí intervalového odhadu. Tento odhad je reprezentován intervalem (I_h , I_d) v němž hledaný parametr leží s předem určenou pravděpodobností (spolehlivostí), kterou označujeme $(1 - \alpha)$. $(1 - \alpha)$ se nazývá spolehlivost odhadu, kde α je hladina významnosti. V technické praxi se spolehlivost odhadu volí nejčastěji 95 % (Hladina významnosti tedy bývá 5%).

V našem případě jsme hledali intervalové odhady střední funkční hodnoty IS^+ a IS^- , ze kterých se konstruuje pás spolehlivosti pro střední hodnotu (regresní křivku). Tedy rozsah, ve kterém se regresní křivka může s 95% pravděpodobností vyskytovat. Stanovení intervalových odhadů není jednoduchou záležitostí. Z těchto důvodů jsme využili programu Statistika.

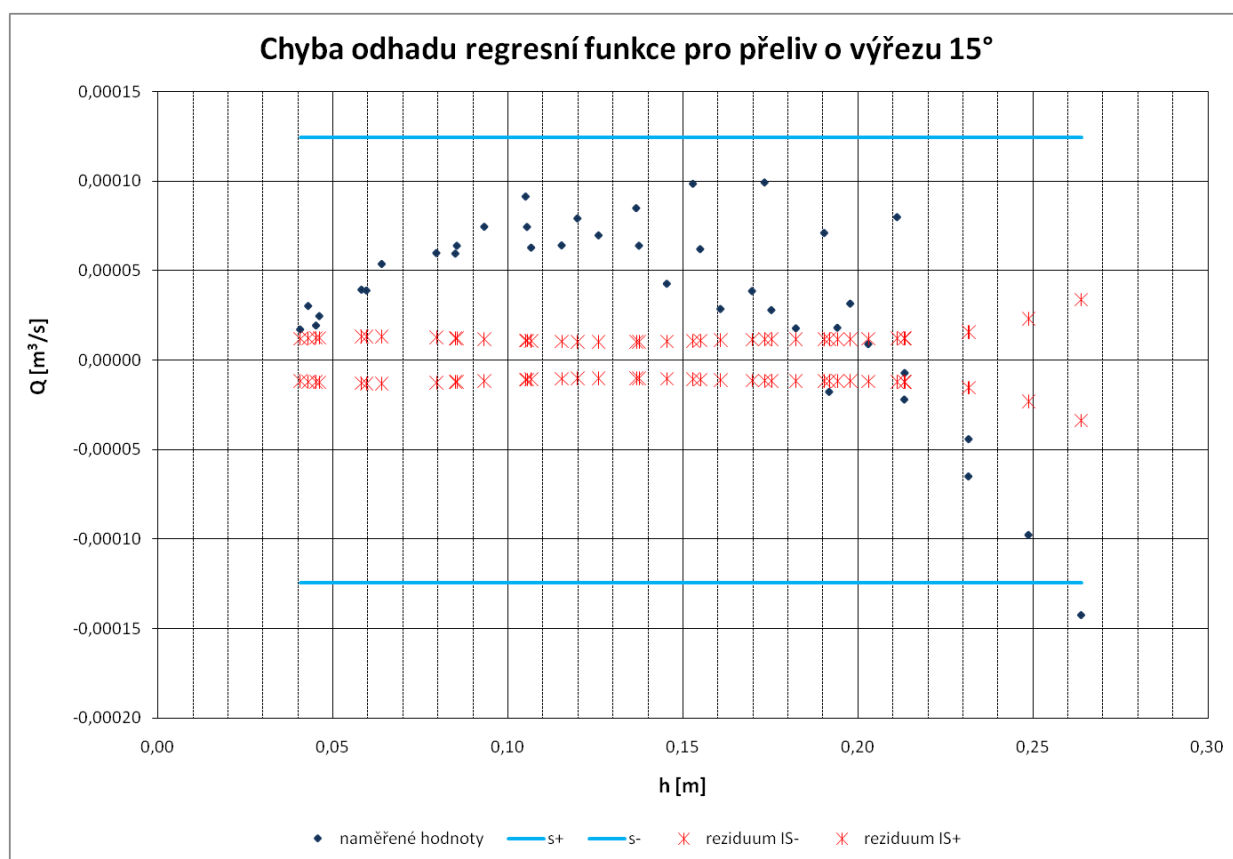
Tento program se zabývá správou dat, jejich analýzou, vizualizací a vývojem uživatelských aplikací. Poskytuje široký výběr základních i pokročilých technik speciálně vyvinutých pro podnikání, vytěžování dat, vědu a inženýrské aplikace. Programem jsme tak stanovili jak Q/h charakteristiky získané našimi postupy v MS Excel, tak i intervalové odhady střední funkční hodnoty reprezentované intervalem IS^+ a IS^- .

Vypočítané hodnoty 95% IS^+ a 95% IS^- tvoří intervalový odhad střední hodnoty regresní funkce na 95% hladině spolehlivosti a z těchto odhadů se konstruuje pás spolehlivosti pro regresní funkci. Vypočítané hodnoty 95% IS^+ a 95% IS^- jsou horní a spodní hranicí pásu spolehlivosti pro regresní funkci. Pro lepší představu jsme v grafu 22 vynesli body pásu spolehlivosti, ty jsou určeny reziduem ($rez IS$) vzniklým rozdílem výsledné regrese (Q_i^R) s intervalovým odhadem střední hodnoty regresní funkce ve smyslu vzorce:

$$rez IS^{+/-} = Q_i^R - 95\% IS^{+/-} \quad (9.1)$$

Nulovou hodnotu v grafu představuje výsledná regrese, k ní jsou vytaženy $rez IS^+$ a $rez IS^-$. Dále je v grafu vynesen bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h na 95% hladině spolehlivosti vypočítaný dle vztahu 9.2

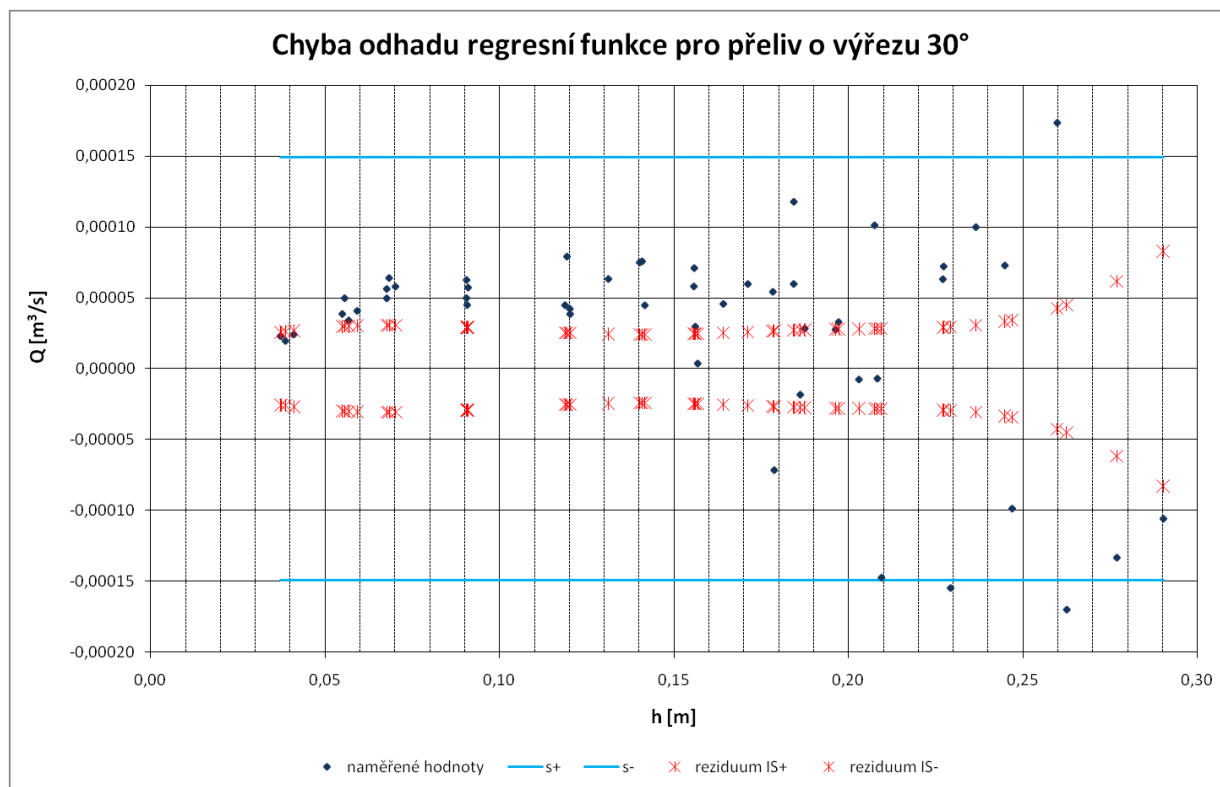
$$s = \left(\sqrt{\frac{s_0}{u-p}} \right) \cdot 2 \quad (9.2)$$



Graf 22

Po důkladném zvážení s návazností na výsledný průběh jednotlivých bodů *rez* IS^+ a *rez* IS^- jsme provedli zprůměrování těchto hodnot a získali chybu odhadu regresní funkce neboli s_{reg} . U přelivu 15° má s_{reg} hodnotu 0,01264 l/s a vytváří tak kolem regresní křivky „průměrný“ pás spolehlivosti na 95% hladině spolehlivosti.

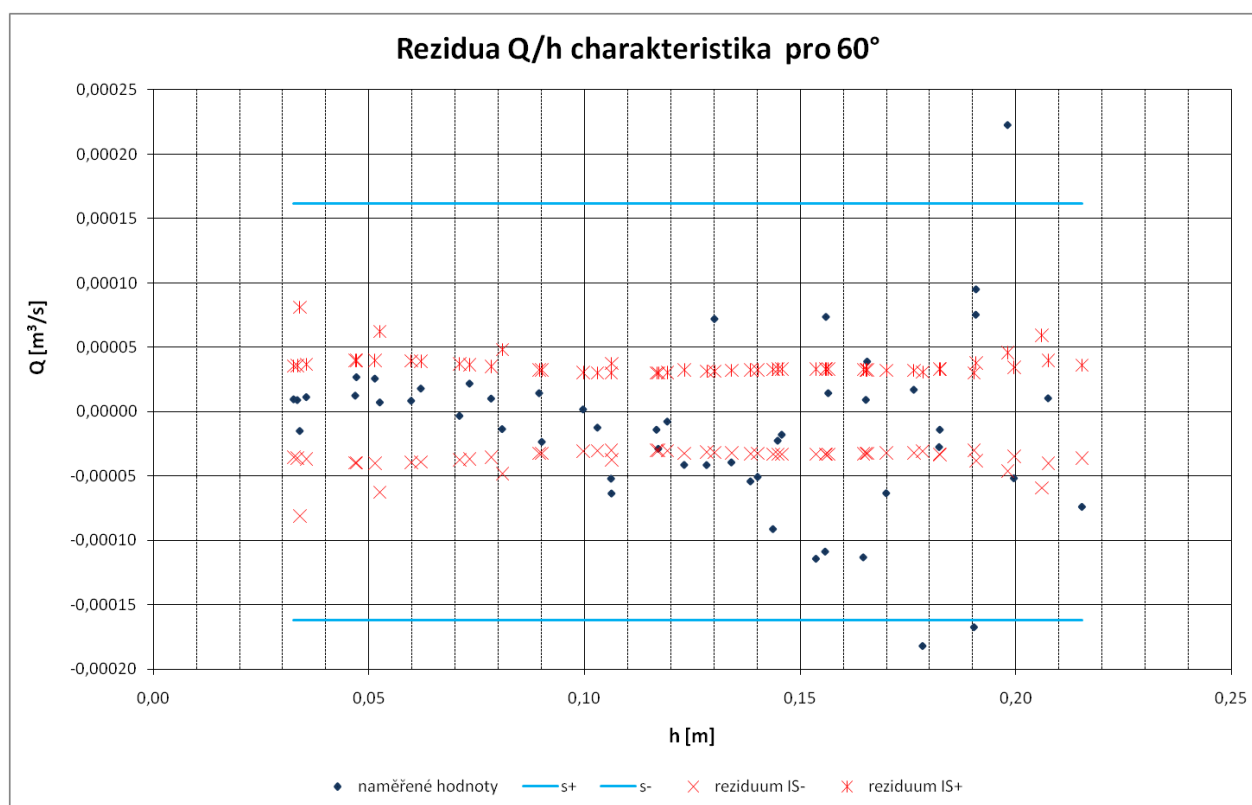
Jak lze vidět bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h dle (9.2) o velikosti 0,12442 l/s, která se vztahuje k naměřeným hodnotám, vykazuje daleko větší hodnotu než chyba odhadu regresní funkce počítaná průměrem z reziduí IS^+ respektive IS^- .



Graf 23

V případě přelivu o výřezu 30° (graf 23) je velikost bodového odhadu směrodatné odchylky od Q/h na 95% hladině spolehlivosti rovna hodnotě 0,149 l/s. Lze vidět, že body dané $rez IS^+$ a $rez IS^-$ jsou v rozsahu od 0,025 l/s po 0,083 l/s, jejich zprůměrováním ve smyslu výše uvedeného získáme hodnotu chyby odhadu regresní funkce $s_{reg} = 0,03$ l/s.

U posledního grafu 24 pro měrný přeliv o výřezu 60°, jsou hodnoty $rez IS^+$ a $rez IS^-$ v rozsahu od 0,03 l/s po 0,062 l/s. Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h , má v tomto případě hodnotu 0,162 l/s a chyba odhadu regresní funkce je rovna 0,036 l/s.



Graf 24

Jak lze vidět bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h ve všech případech vykazuje daleko větší hodnotu jak chyba odhadu regresní funkce. Tím se nám potvrzuje správná volba pracovat pouze s hodnotou chyby odhadu regresní funkce v dalších výpočtech, při kterých již užíváme k analýze pouze regresní křivky.

10 NEJISTOTA MĚŘENÍ

Pro konkrétní aplikaci je vedle výsledku měření třeba udat i jeho přesnost (nejistotu), proto se v následujících kapitolách budeme zabývat stanovením nejistoty v měření průtoku na měrných clonách.

10.1 Obecné pojednání o nejistotě měření

Jak uvádí [8], nejistota měření je číslo udávající interval v okolí výsledku měření. Stanovení tohoto intervalu je založeno na statistickém zpracování měřených hodnot. Základní charakteristikou nejistoty je standardní nejistota. Tuto nejistotu je možné vyjádřit v hodnotách měřené veličiny, potom ji nazýváme absolutní standardní nejistota nebo poměrem mezi absolutní standardní nejistotou a hodnotou příslušné veličiny. V tomto případě ji nazýváme

relativní standardní nejistota (většinou tuto hodnotu násobíme 100 a vyjadřujeme v procentech).

Standardní nejistoty dělíme podle způsobu vyhodnocení na standardní nejistoty typu A, standardní nejistoty typu B a kombinovaná standardní nejistota. Nejistota typu A, je stanovena statistickým zpracováním n -krát opakovaně měřeného parametru X , při stejných podmínkách a vzájemné nezávislosti jednotlivých měření x_1, x_2, \dots, x_n . Nejistotu typu B obecně musí stanovit experimentátor odhadem či převzetím z technické dokumentace. Technickou dokumentací se zpravidla rozumí – certifikáty, ověřovací a kalibrační listy, technické normy, typová osvědčení, údaje výrobců použitých zařízení, technické tabulky apod. Zdroje nejistot typu B při měření pocházejí z nedokonalostí použitých měřicích přístrojů a systémů, použitých metod měření, podmínek měření, vztahů, závislostí a metod použitých při vyhodnocování. Kombinovaná nejistota se určuje z předešlých dvou nejistot.

10.2 Konkrétní aplikace nejistoty měření

V této podkapitole se budeme zabývat jak nejistotami stanovení průtoku v laboratoři tak nejistotami, které vzniknou při měření *in situ*. Při měření na měrné cloně v kanalizaci, může docházet k měření opakované hodnoty a tím ke stanovení nejistoty typu A. V našem případě se ale pracuje pouze s nejistotou typu B, u které se provádí kvalifikované odhady hodnot očekávaných zdrojů nejistot a z nich se následně získají příslušné výsledky.

Stanovení nejistoty typu B odhadem sestává z následujících kroků:

- odhadne se rozsah změn odchylek $\pm z_{Xmax}$ od nominální veličiny parametru X tak, že překročení těchto hodnot je málo pravděpodobné;
- posoudí se průběh pravděpodobnosti odchylek v odhadnutém intervalu a podle níže uvedených zásad se vybere hodnota ε . V našem případě je to hodnota $\varepsilon=3$, protože rozdělení funkce chyb vznikajících při většině měření má Gaussovo normální rozdělení;
- stanoví se hodnota směrodatné odchylky parametru X dle vztahu:

$$s_X = \frac{z_{Xmax}}{\varepsilon} \quad (10.1)$$

Uvažujme nyní funkci Y , která je funkcí nezávislých parametrů X_1, X_2, \dots, X_m tedy

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_m).$$

Potom standardní nejistota typu B - u_{BY} funkce X je dána Gaussovým zákonem šíření chyb

$$u_{BY} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1} s_{x1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2} s_{x2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_m} s_{xm}\right)^2}, \quad (10.2)$$

kde s_{xi} – směrodatná odchylka parametru X_i

$\frac{\partial Y}{\partial x_i}$ -parciální derivace funkce X podle parametru X_i

10.3 Výpočet nejistot pro měrné clony

Rovnice pro stanovení průtoku pomocí přelivu s trojúhelníkovým výřezem má tvar:

$$Q = C \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) h^{2,5}. \quad (10.3)$$

Stanovení nejistoty typu B u tíhového zrychlení můžeme zanedbat a v případě stanovení přesnosti úhlu výřezu musíme odhadnout odchylku z_α . V případě stanovení výšky přepadového paprsku je to složitější, nejistota se bude skládat z několika dílčích nejistot.

Je to nejistota v nastavení referenční úrovně (nuly), dále je to vlastní přesnost měřidla hloubky se zahrnutím vlivu případné nelinearity a stabilita hladiny (její fluktuace kolem časově střední úrovně při ustáleném proudění). Nejistotu pocházející z nastavení referenční úrovně měřidla je nutné odhadnout, pro naše účely ji budeme značit z_{ref} . Nejistotu z přesnosti měřidla výšky se zahrnutím vlivu případné nelinearity je stanovena z typového osvědčení jako odchylka z_{lin} a nejistota způsobená fluktuací hladiny závisí na hladinových poruchách, které jsou způsobeny mnoha faktory, tedy odchylka od časově vyhlazené úrovně hladiny při ustáleném průtoku z_{fl} . Tyto odchylky jsou stanoveny na základě kvalifikovaného odhadu, zkušeností a běžně v praxi užívaných hodnot.

V případě stanovení průtoku v laboratoři, jsou výše zmíněné odchylky nulové a vzniká pouze nejistota v měření magneticko-indukčním průtokoměrem a nejistota ve stanovení odhadu regresní funkce. V druhém případě, při nasazení měrné clony v in situ, jsou brány v potaz všechny uvedené odchylky, a tedy pro určení standardní nejistoty typu B je nutné nejdříve stanovit hodnoty směrodatných odchylek s_{ref} , s_{lin} , s_{fl} a s_α . Při uvažování normálního rozdělení odchylek ($\varepsilon = 3$) na hladině spolehlivosti 95% budou vztahy vypadat takto:

$$s_{ref} = \frac{2z_{ref}}{3} \quad (10.4)$$

$$s_{lin} = \frac{2z_{lin}}{3} \quad (10.5)$$

$$s_{fl} = \frac{2z_{fl}}{3} \quad (10.6)$$

$$s_{\alpha} = \frac{2z_{\alpha}}{3} \quad (10.7)$$

Hodnoty parciálních derivací (citlivostních koeficientů) funkce 10.3 podle parametru h a parametru α budou

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = BC \frac{8}{15} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{2g} h^{(B-1)}, \quad (10.8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = \frac{1}{2} \left(\frac{C \frac{8}{15} \sqrt{2g} h^B}{\cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right). \quad (10.9)$$

A standardní nejistota typu B se určí z rovnice 10.10

$$u_{QB} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial h} s_{ref}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} s_{lin}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial h} s_{fl}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \alpha} s_{\alpha}\right)^2}. \quad (10.10)$$

Abychom získali výslednou celkovou nejistotu stanovení průtoku v in situ u_Q , musíme do ní ještě zahrnout nejistotu z laboratoře, která je dána směrodatnou odchylkou regrese s_{reg} dále značenou už jen jako s a nejistotou v měření průtoku magneticko-indukčním průtokoměrem u_{MID} , která je převzata z kalibračního listu průtokoměru

$$u_Q = \sqrt{u_{BQ}^2 + s^2 + u_{MID}^2}. \quad (10.11)$$

V další kapitole bychom se zaměřili na výpočty nejistot jednotlivých měrných clon. Pro každou měrnou clonu jsme počítali čtyři případy kombinací maximálních a minimálních odchylek vstupních parametrů na hladině spolehlivosti 95%. Pro každou variantu vstupních

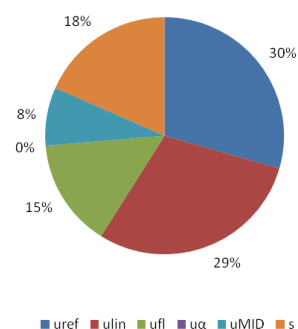
parametrů jsme zvolili reprezentativní hloubku 0,15 m a porovnali jednotlivé vlivy podílející se na celkové nejistotě stanovení průtoku pro všechny tři typy měrných clon.

Dále jsou ke každé kombinaci odchylek vstupních parametrů uvedeny tabulky pro jednotlivé měrné clony s jejich výslednými absolutními hodnotami nejistot pro pět charakteristických hodnot přepadové výšky v rozsahu od 0,07 m po 0,3 m.

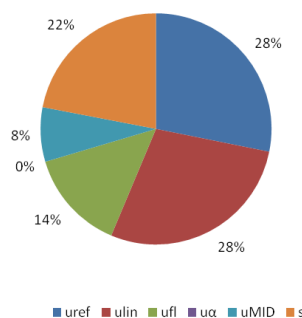
Minimální odchylky měření přepadové výšky, minimální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,001	m	s_{ref}	0,000667	m
z_{lin}	0,001	m	s_{lin}	0,000667	m
z_{fl}	0,0005	m	s_{fl}	0,000333	m
z_{α}	0	°	s_{α}	0	rad

Tab. 23 Varianta 1.

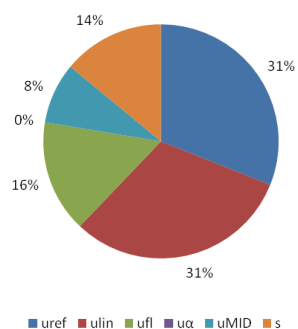
Poměr nejistot u výřezu 15° při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 30° při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 60° při přepadové výšce 0,15 m



Graf 25

V případě grafu 25, kdy jsou všechny odchylky minimální a odchylka úhlu α je nulová, se na celkové nejistotě nejvíce podílí u všech typů měrných clon nejistota z nastavení referenční úrovně a nejistota linearit (přesnosti měřidla výšky). Největší vliv chyby odhadu regresní funkce na celkovou nejistotu je u výřezu 30°, kdy se hodnota pohybuje okolo 22%. V případě výřezu 15° a výřezu 60° se směrodatná odchylka pohybuje v procentuálním ovlivnění celkové nejistoty podobně jako odchylka u nejistoty z fluktuace hladiny.

Dále jsou uvedeny výsledné tabulky s celkovými absolutními i relativními hodnotami nejistot ve stanovení průtoku pro všechny tři typy měrných clon.

h	Q_{15}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
-----	------------	----------	-----------	-----	-------	-------

[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,070	0,00027	0,0000097	0,00000081	0,00001264	0,00001595	5,88
0,130	0,00127	0,0000245	0,00000382	0,00001264	0,00002784	2,18
0,190	0,00329	0,0000433	0,00000987	0,00001264	0,00004619	1,40
0,250	0,00654	0,0000654	0,00001961	0,00001264	0,00006941	1,06
0,300	0,01031	0,0000859	0,00003094	0,00001264	0,00009220	0,89

Tab. 24 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 15°

h	Q_{30}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,070	0,00051	0,00001839	0,00000154	0,00003000	0,00003522	6,84
0,130	0,00242	0,00004653	0,00000726	0,00003000	0,00005584	2,31
0,190	0,00625	0,00008222	0,00001875	0,00003000	0,00008951	1,43
0,250	0,01241	0,00012409	0,00003723	0,00003000	0,00013298	1,07
0,300	0,01957	0,00016312	0,00005872	0,00003000	0,00017595	0,90

Tab. 25 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 30°

h	Q_{60}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,070	0,00108	0,00003866	0,00000325	0,00003642	0,00005321	4,92
0,130	0,00509	0,00009784	0,00001526	0,00003642	0,00010551	2,07
0,190	0,01314	0,00017288	0,00003942	0,00003642	0,00018102	1,38
0,250	0,02609	0,00026092	0,00007828	0,00003642	0,00027484	1,05
0,300	0,04116	0,00034299	0,00012348	0,00003642	0,00036636	0,89

Tab. 26 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 60°

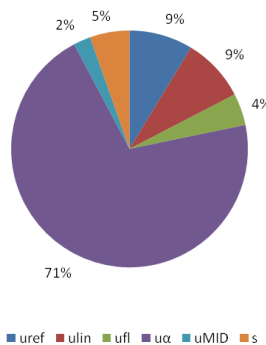
Lze vidět, že s narůstající přepadovou výškou se hodnoty nejistot snižují a v případě přepadové výšky 0,3 m u všech tří typů přelivů jsou tyto hodnoty pod jedním procentem. V případě porovnání průtoků zjistíme, že nejmenší nejistoty vykazuje úhel 15°. Při průtoku 5 - 6 l/s lze vidět, že největší nejistotu 2,1 % má přeliv o výřezu 60°, u výřezu 30° je to kolem 1,4 % a nejmenší hodnotu vykazuje výřez o 15° 1,1%.

Minimální odchylky měření přepadové výšky, maximální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,001	m	s_{ref}	0,000667	m
z_{lin}	0,001	m	s_{lin}	0,000667	m
z_{fl}	0,0005	m	s_{fl}	0,000333	m
z_{α}	2	°	s_{α}	0,023259	rad

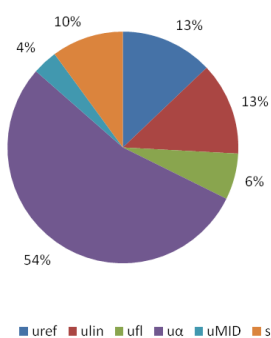
Tab. 27 Varianta 2.

V tabulce 27 máme druhou variantu kombinací odchylek, kdy odchylky v měření přepadové výšky zůstávají minimální, pouze se změnil odchylka úhlu α na maximální hodnotu 2°. Jednotlivé vlivy odchylek na celkovou nejistotu ve stanovení průtoku lze vidět v grafu 26. Největší vliv jak je hned patrné má odchylka úhlu α . V případě výřezu 15° je tento vliv největší a tvoří celých 71% celkové nejistoty stanovení průtoku na přelivu. Nejmenší vliv odchylky úhlu je na přeliv o výřezu 60°, kdy se podílí na celkové nejistotě stanovení průtoku z 43%. Nejistoty linearity a nastavení referenční úrovně hladiny mají stejný procentuální dopad na celkovou nejistotu u všech třech typů přelivů.

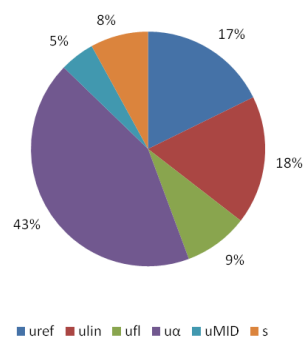
Poměr nejistot u výřezu 15°
při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 30°
při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 60°
při přepadové výšce 0,15 m



Graf 26

Podobně jako tomu bylo v předešlém textu, jsou dále uvedeny výsledné tabulky s celkovými absolutními i relativními hodnotami nejistot ve stanovení průtoku pro všechny tři typy měrných clon.

h	Q_{15}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[%]
0,070	0,00027	0,0000262	0,00000081	0,00001264	0,00002914	10,74
0,130	0,00127	0,0001172	0,00000382	0,00001264	0,00011795	9,25
0,190	0,00329	0,0002991	0,00000987	0,00001264	0,00029958	9,10
0,250	0,00654	0,0005914	0,00001961	0,00001264	0,00059191	9,05
0,300	0,01031	0,0009312	0,00003094	0,00001264	0,00093183	9,04

Tab. 28 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 15°

h	Q_{30}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[%]
0,070	0,00051	0,00003020	0,00000154	0,00003000	0,00004260	8,28
0,130	0,00242	0,00012186	0,00000726	0,00003000	0,00012571	5,20
0,190	0,00625	0,00030224	0,00001875	0,00003000	0,00030430	4,87
0,250	0,01241	0,00059077	0,00003723	0,00003000	0,00059270	4,78
0,300	0,01957	0,00092560	0,00005872	0,00003000	0,00092795	4,74

Tab. 29 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 30°

h	Q_{60}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s_{reg}	u_Q	u_Q
[m]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[%]
0,070	0,00108	0,00004838	0,00000325	0,00003642	0,00006064	5,60
0,130	0,00509	0,00016811	0,00001526	0,00003642	0,00017268	3,39
0,190	0,01314	0,00039308	0,00003942	0,00003642	0,00039673	3,02
0,250	0,02609	0,00074806	0,00007828	0,00003642	0,00075303	2,89
0,300	0,04116	0,00115788	0,00012348	0,00003642	0,00116502	2,83

Tab. 30 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 60°

V případě této kombinace odchylek je situace jiná než v předešlé variantě, nejistoty měření jsou podstatně vyšší. Se zmenšujícím se úhlem výřezu měrné clony se zvětšují nejistoty měření průtoku. Tedy v případě měrné clony o výřezu 15° jsou hodnoty nejistot nejvyšší a i u hodnoty přepadové výšky 0,3 neklesají pod hranici 9%. U měrné clony o výřezu 30° jsou hodnoty nejistot o něco lepší, při přepadové výšce 0,3 m je relativní hodnota nejistoty 4,75%. Měrná clona o výřezu 60° vykazuje v tomto případě nejnížší hodnoty nejistot.

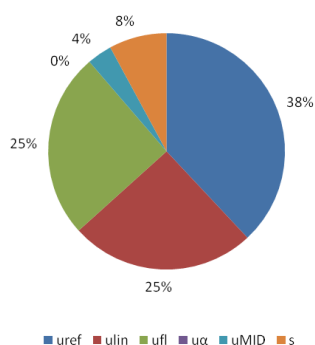
V tabulce 31 jsou hodnoty třetí varianty odchylek, kdy odchylka úhlu α je opět nulová ale odchylky v měření přepadové výšky jsou maximální.

Maximální odchylky měření přepadové výšky, minimální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,003	m	s_{ref}	0,002	m
z_{lin}	0,002	m	s_{lin}	0,001333	m
z_{fl}	0,002	m	s_{fl}	0,001333	m
z_{α}	0	°	s_{α}	0	rad

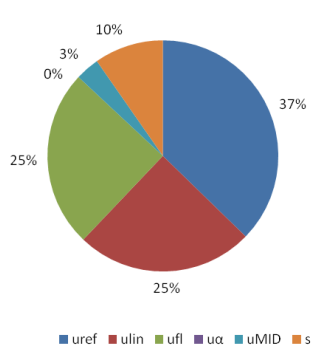
Tab. 31 Varianta 3.

Z grafů 27 je zřejmé že největší podíl na celkové nejistotě stanovení průtoku má nejistota z nastavení referenční úrovně. Ve všech třech případech je tato hodnota nad 35 % celkové nejistoty. Nejistoty fluktuace hladiny a linearitu měřicího zařízení ovlivňují celkovou nejistotu stanovení průtoku hodnotou okolo 25 %.

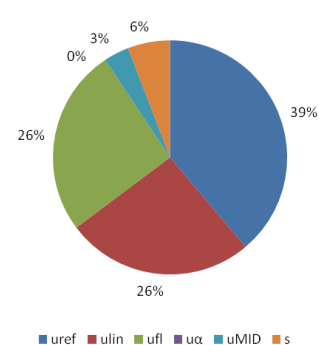
Poměr nejistot u výřezu 15°
při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 30°
při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 60°
při přepadové výšce 0,15 m



Graf 27

Opět pro názornost jsou dále uvedeny výsledné tabulky s celkovými absolutními i relativními hodnotami nejistot ve stanovení průtoku pro všechny tři typy měrných clon.

h	Q_{15}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,070	0,00027	0,0000266	0,00000081	0,00001264	0,00002948	10,87
0,130	0,00127	0,0000674	0,00000382	0,00001264	0,00006866	5,39
0,190	0,00329	0,0001191	0,00000987	0,00001264	0,00012013	3,65
0,250	0,00654	0,0001797	0,00001961	0,00001264	0,00018119	2,77
0,300	0,01031	0,0002362	0,00003094	0,00001264	0,00023856	2,31

Tab. 32 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 15°

h	Q_{30}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[%]
0,070	0,00051	0,00005054	0,00000154	0,00003000	0,00005879	11,42
0,130	0,00242	0,00012790	0,00000726	0,00003000	0,00013157	5,44
0,190	0,00625	0,00022599	0,00001875	0,00003000	0,00022874	3,66
0,250	0,01241	0,00034109	0,00003723	0,00003000	0,00034443	2,78
0,300	0,01957	0,00044838	0,00005872	0,00003000	0,00045320	2,32

Tab. 33 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 30°

h	Q_{60}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[%]
0,070	0,00108	0,00010626	0,00000325	0,00003642	0,00011238	10,38
0,130	0,00509	0,00026894	0,00001526	0,00003642	0,00027182	5,34
0,190	0,01314	0,00047519	0,00003942	0,00003642	0,00047821	3,64
0,250	0,02609	0,00071721	0,00007828	0,00003642	0,00072239	2,77
0,300	0,04116	0,00094280	0,00012348	0,00003642	0,00095155	2,31

Tab. 34 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 60°

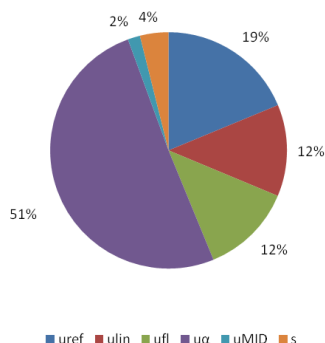
U této varianty jsou hodnoty nejistot ve stanovení průtoku opět vyšší. Největší nejistoty vykazuje přeliv o výřezu 60°. Při průtoku 5 - 6 l/s má nejistotu 5,3 %, naopak přeliv o výřezu 15° disponuje nejistotou 2,7 %.

V poslední tabulce 35 vycházíme z varianty, kdy všechny odchylky jsou maximální. Z grafického vyjádření (graf 28) lze vidět, že vliv odchylky úhlu zůstal v případě výřezu o 15° velmi vysoký, podílí se na celkové nejistotě celou polovinou, 12% vlivu má linearita měřícího zařízení a případná fluktuace hladiny.

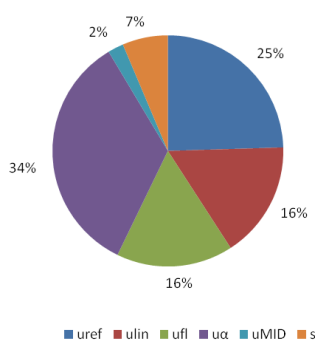
Maximální odchylky měření přepadové výšky, maximální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,003	m	s_{ref}	0,002	m
z_{lin}	0,002	m	s_{lin}	0,001333	m
z_{fl}	0,002	m	s_{fl}	0,001333	m
z_{α}	2	°	s_{α}	0,023259	rad

Tab. 35 Kombinace odchylek přepadové výšky s odchylkou úhlu α

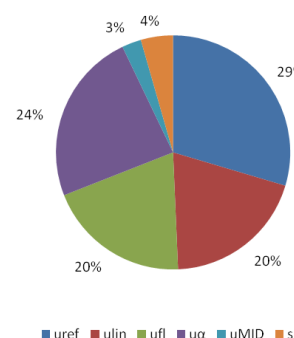
Poměr nejistot u výřezu 15°
při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 30°
při přepadové výšce 0,15 m



Poměr nejistot u výřezu 60°
při přepadové výšce 0,15 m



Graf 28

Na závěr jsou taktéž uvedeny výsledné tabulky s celkovými absolutními i relativními hodnotami nejistot ve stanovení průtoku pro všechny tři typy měrných clon.

h	Q_{15}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,070	0,00027	0,0000361	0,00000081	0,00001264	0,00003826	14,11
0,130	0,00127	0,0001330	0,00000382	0,00001264	0,00013361	10,48
0,190	0,00329	0,0003190	0,00000987	0,00001264	0,00031944	9,70
0,250	0,00654	0,0006147	0,00001961	0,00001264	0,00061512	9,41
0,300	0,01031	0,0009569	0,00003094	0,00001264	0,00095746	9,29

Tab. 36 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 15°

h	Q_{30}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,070	0,00051	0,00005593	0,00000154	0,00003000	0,00006349	12,33
0,130	0,00242	0,00017042	0,00000726	0,00003000	0,00017319	7,16
0,190	0,00625	0,00036832	0,00001875	0,00003000	0,00037002	5,92
0,250	0,01241	0,00067079	0,00003723	0,00003000	0,00067249	5,42
0,300	0,01957	0,00101547	0,00005872	0,00003000	0,00101760	5,20

Tab. 37 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 30°

h	Q_{60}^R	u_{BQ}	u_{MID}	s	u_Q	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]
0,070	0,00108	0,00011017	0,00000325	0,00003642	0,00011608	10,72
0,130	0,00509	0,00030169	0,00001526	0,00003642	0,00030426	5,98
0,190	0,01314	0,00059197	0,00003942	0,00003642	0,00059440	4,52
0,250	0,02609	0,00100295	0,00007828	0,00003642	0,00100666	3,86
0,300	0,04116	0,00145324	0,00012348	0,00003642	0,00145893	3,54

Tab. 38 Výsledné absolutní hodnoty nejistot pro přeliv o výřezu 60°

V případě kombinace, kdy předpokládaná odchylka úhlu α je maximální jsou nejistoty ve stanovení průtoku podstatně vyšší. Při průtoku okolo 12 l/s největší nejistotu vykazuje přeliv o výřezu 15° a to 9 %, přeliv o výřezu 60° má v tomto případě nejmenší nejistotu 4,5 %. Lze usoudit, že největší vliv na velikost nejistoty má právě tato odchylka.

Když shrneme výsledky, které jsme získali, zjistíme, že pokud je odchylka úhlu α minimální, vykazuje nejmenší nejistoty při měření průtoku clona o výřezu 15°. V případě, kdy odchylka úhlu má maximální hodnoty, měření s nejmenšími nejistotami je na cloně o výřezu 60°. U clony o výřezu 30° se nejistoty pohybují přibližně uprostřed mezi maximálními a minimálními hodnotami, které vykazují clony o výřezu 15° a 60°. Volba měrné clony je závislá na rozsahu průtoku. Měrná clona musí být dostatečně citlivá a zároveň musí převést i maximální průtok. Dále se můžeme řídit dle grafů s procentuálním vyjádřením jednotlivých vlivů odchylek na celkové nejistotě, při instalaci měrné clony do kanalizačního potrubí. Podle těchto údajů se zaměříme na odchylky, které nejvíce ovlivňují velikost nejistoty a při instalaci se snažíme tyto možné odchylky minimalizovat.

11 MODELOVÁ PODOBNOST A JEJÍ UŽITÍ PŘI STANOVENÍ Q/H CHARAKTERISTIK PRO VĚTŠÍ PRŮMĚRY POTRUBÍ

Dle [9] při hydrotechnickém výzkumu se ve speciálně vybavených laboratořích řeší hydrodynamické problémy na modelech vodních děl i toků a na modelech vodohospodářských objektů a zařízení. Modelem v užším smyslu rozumíme provedení skutečného díla a nebo jeho části, ve zmenšeném měřítku (vlastní model). Pod pojmem model

v širším smyslu zahrnujeme celý zmenšený systém, jak vlastní model, tak i znázornění celého prostředí, které jej obklopuje. Výzkum provádíme na základě teorie podobnosti mezi modelem a skutečným dílem.

Mechanickou podobnost můžeme celkově definovat takto: Dva útvary (skutečnost-model) jsou si mechanicky podobné, jsou-li si podobné geometricky, kinematicky a dynamicky.

Sestrojíme-li zmenšený model libovolného předmětu tak, aby tvar modelu přesně odpovídal skutečnosti, a tedy každý rozměr byl zmenšen ve stejném měřítku a příslušné úhly byly stejné, mluvíme o geometrické podobnosti modelu a skutečnosti. Uvažujeme nyní dva útvary (skutečný útvar a jeho model) - v pohybu a sledujeme dráhy opsané homologickými body (odpovídající si body dvou útvarů). Jestliže homologické body obou útvarů leží na homologických bodech jejich drah v úměrných dobách, hovoříme o podobnosti kinematické.

Froudův zákon představuje podmínku dynamické podobnosti jevů za výhradního působení gravitačních sil (zemské tíže), ovlivňujících jev proudění na modelu i skutečném díle. Další síly, jako např. odpor třením vazké kapaliny, kapilární síly, síly objemové pružnosti a vliv vznikajících kavitačních jevů buď na jev proudění nepůsobí, anebo jejich účinky můžeme zanedbat.

V hydrotechnickém výzkumu vzhledem k nemožnosti dodržet současně všechna kritéria podobnosti pracujeme vždy s podobností pouze přibližnou. To však nevylučuje velmi dobré výsledky, pokud za kritérium podobnosti uvažujeme ten zákon, který vyjadřuje poměr sil toho druhu, který zkoumaný jev určuje nebo je rozhodující a nad ostatními druhy sil převládá. Mezní podmínky nám v tomto případě omezují především geometrické měřítko zmenšení modelu tak, aby při jevu zkoumaném na modelu nedosáhla jiná síla než ta, podle které jev modelujeme, takové velikosti, aby jej mohla podstatněji ovlivnit. Mezi tyto „jiné“ síly mohou v našem případě patřit ty, které jsou způsobené povrchovým napětím. Abychom se jejich vlivu vyhnuli, nezmenšujeme modely pod určitou mez tak, aby tyto síly byly na modelu téměř právě tak bezvýznamné jako v převážném počtu případů ve skutečnosti. Samostatné výzkumné práce ukázaly, že má-li při modelování podle Froudova zákona být vliv povrchového napětí i kapilarity zanedbatelný, musí být na modelu dodržena minimální mezní hodnota a to taková, že přepadová výška paprsku na ostrohranném přepadu musí být $h > 60$ mm, aby se naměřený tvar paprsku dal extrapolovat.

Jedině uspokojí-li se tato podmínka, bude vliv povrchového napětí u modelu s vodou běžné teploty natolik zanedbatelný, že nebude mít na sledované proudění vliv.

Měřítka všech veličin jsou vyjádřena jen měřítkem délek M_l , tj. měřítkem zmenšení modelu proti skutečnosti. Toto měřítko nám tedy v praxi stačí k tomu, abychom mohli určit poměr mezi veličinami, které charakterizují podobné pohybové jevy. V následujících dvou vzorcích jsou uvedeny vztahy pro vyjádření měřítka délek, průtoku a svislé odlehlosti vrcholu výřezu ode dna při platnosti Froudova zákona podobnosti

$$M_l = \frac{DN_{sk}}{DN_{model}} , \quad (11.1)$$

$$Q_{sk} = Q_{model} M_l^{5/2} , \quad (11.2)$$

$$p_{sk} = M_l p_{model} \quad (11.3)$$

kde DN_{sk} je průměr skutečného potrubí, DN_{model} je průměr modelu potrubí, na kterém byl proveden hydrotechnický výzkum a na těchto průměrech jsou pak závislé i velikosti průtoků, tedy skutečného průtoku Q_{sk} a průtoku, který byl naměřen na modelu Q_{model} . V případě svislé odlehlosti je tato závislost podobná. p_{model} je velikost svislé odlehlosti změřena na modelu a pokud tuto veličinu vynásobíme modelovým měřítkem, získáme skutečnou svislou odlehlost p_{sk} na zvoleném skutečném průměru potrubí.

12 POSTUP PŘI NÁVRHU KONKRÉTNÍ MĚRNÉ CLONY

Jak již bylo uvedeno dříve, budeme stanovovat Q/h charakteristiky i pro větší kruhové profily. Zvolili jsme rozpětí od DN 300 po DN 1500. V tabulce 39 jsme na základě modelové podobnosti přepočítali pro jednotlivé DN svislou odlehlost vrcholu výřezu ode dna koryta.

DN	p _{MIN}	p ₁	p ₂	p _{MAX}
[mm]	[m]	[m]	[m]	[m]
300	0	0,024	0,048	0,079
378	0	0,030	0,060	0,100
400	0	0,032	0,063	0,106
500	0	0,040	0,079	0,132
600	0	0,048	0,095	0,159
700	0	0,056	0,111	0,185
800	0	0,063	0,127	0,212
900	0	0,071	0,143	0,238
1000	0	0,079	0,159	0,265
1100	0	0,087	0,175	0,291
1200	0	0,095	0,190	0,317
1300	0	0,103	0,206	0,344
1400	0	0,111	0,222	0,370
1500	0	0,119	0,238	0,397

Tab. 39 Svislé odlehlosti vrcholu výřezu ode dna pro všechny zadané DN

V tabulce 39 jsou červeně znázorněny rozměry modelu, na kterém probíhalo měření. Dále máme uvedeny vždy čtyři hodnoty p pro jeden průměr z důvodu větší variability při nasazení clony při monitoringu in-situ. V dalším kroku vycházíme z předchozí tabulky, v příložených výpočtech na CD v záložce NÁVRH MĚRNÉ CLONY má uživatel k dispozici tabulku pro její návrh. Pro ukázkou jsme uvedli příklad na obrázku 36. V němž si uživatel zadá základní požadavky: hodnotu DN, svislou odlehlost vrcholu výřezu ode dna a maximální průtok. Tyto údaje jsou následně doplněny námi vypočítanými koeficienty B a C a dále zpracovány v tabulce, která vyhodnocuje vhodnost či nevhodnost dané clony.

NÁVRH MĚRNÉ CLONY

Zadává se:

DN=	700	mm	0,7	m
Q _{max} =	110	l/s	0,11	[m ³ /s]
p=	0,111	m		

Získáno modelovým výzkumem

B	2,5
----------	-----

α	α	$90^\circ - (\alpha/2)$	C
[°]	[rad]	[rad]	[-]
15	0,2617	1,4392	0,6729
30	0,5233	1,3083	0,6277
60	1,0467	1,0467	0,6126

Návrh typu měrné clony

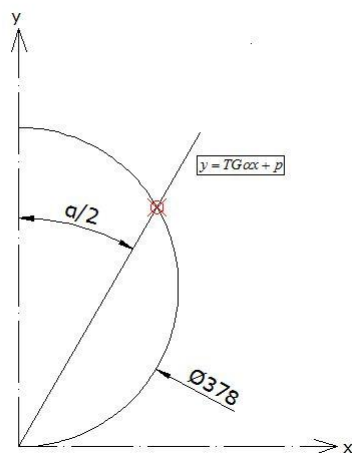
	Měrná clona		
	60 [°]	30 [°]	15 [°]
h_{MAX} [m]	0,4638	0,5555	0,5804
$Q_{MAXclony}$ [l/s]	0,1224	0,0913	0,0537
h [m]	0,4445	0,5984	0,7733
$(h_{MAX} - h)$ [m]	0,0193	-0,0429	-0,1929
vhodnost	vhodný	nevhodný	nevhodný

Pozn:

 h_{MAX} - určuje maximální přepadovou výšku na přelivu Q_{clony} - maximální průtok, který může clona změřit h - přepadová výška dána Q_{MAX} $(h_{MAX} - h)$ - rozdíl výšek (určuje vhodnost/nevhodnost přelivu)

Obr. 36 Návrh měrné clony

Na prvním řádku této výsledné tabulky je uvedena maximální přepadová výška h_{MAX} , kterou je možno na přelivu dosáhnout, je omezena velikostí p a úhlem, výpočet byl proveden analyticky, kdy byl nalezen průsečík kružnice s přímkou pod úhlem $90^\circ - (\alpha/2)$, (obrázek 37).



Obr. 37

Další přepadová výška h vychází ze zadaného maximálního průtoku, je tedy vypočítaná ze základní rovnice ve smyslu vzorce 12.1

$$h = \sqrt[5]{\left(\frac{Q_{max}}{C_{15} \cdot t_g \left(\frac{\alpha}{2}\right) \sqrt{2g}}\right)^2} \quad (12.1)$$

Rozdíl přepadových výšek ($h_{MAX} - h$) udává, zda je clona schopna převést maximální průtok nebo ne a zároveň vybírá nejvhodnější clonu pro měření. V případě záporných hodnot měrná clona nemá dostatečnou kapacitu na převedení průtoku a volí se clony o větším výřezu. Na posledním řádku je vyhodnocovací funkce, zpracovávající zadané informace s požadavkem, aby přepadová výška byla co největší, dle tohoto požadavku se určuje vhodnost či nevhodnost přelivu.

12.1 Výsledné Q/h charakteristiky a jejich nejistoty pro větší průměry potrubí

Díky návrhu měrné clony, dostane uživatel informaci o tom, který ze tří typů měrných clon by měl použít. Jako další krok nutný pro určení nejistoty stanoveného průtoku po instalaci clony do měrného profilu in situ je zvolení velikostí odchylek od měření přepadové výšky a odchylky úhlu α . V tomto případě jsme zvolili opět čtyři kombinace maximálních a minimálních odchylek s jejich směrodatnými odchylkami na hladině spolehlivosti 95%, které jsou uvedené v tabulce 40.

Minimální odchylky měření přepadové výšky, minimální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,001	m	s_{ref}	0,000667	m
z_{lin}	0,001	m	s_{lin}	0,000667	m
z_{fl}	0,0005	m	s_{fl}	0,000333	m
z_{α}	0	°	s_{α}	0	rad

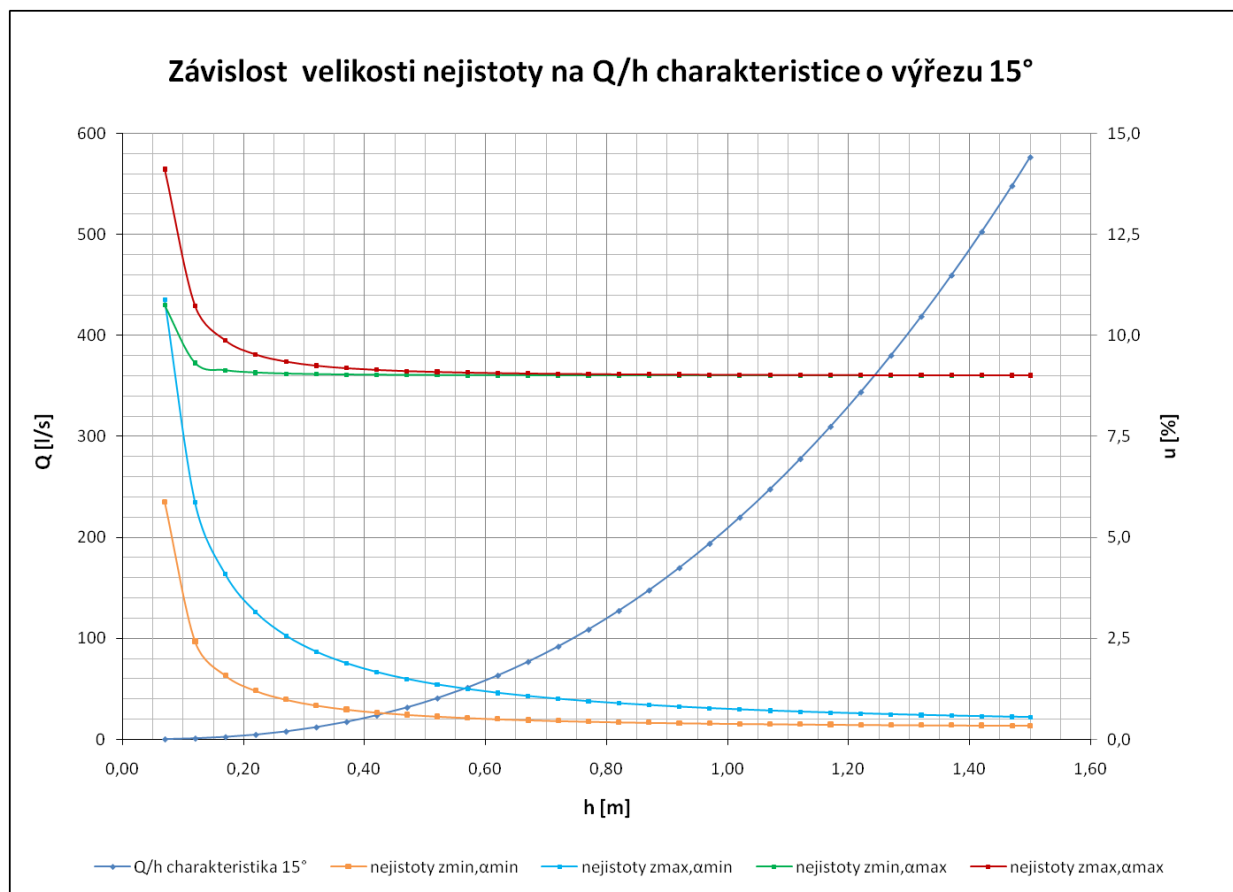
Minimální odchylky měření přepadové výšky, maximální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,001	m	s_{ref}	0,000667	m
z_{lin}	0,001	m	s_{lin}	0,000667	m
z_{fl}	0,0005	m	s_{fl}	0,000333	m
z_{α}	2	°	s_{α}	0,023259	rad

Maximální odchylky měření přepadové výšky, minimální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,003	m	s_{ref}	0,002	m
z_{lin}	0,002	m	s_{lin}	0,001333	m
z_{fl}	0,002	m	s_{fl}	0,001333	m
z_{α}	0	°	s_{α}	0	rad

Maximální odchylky měření přepadové výšky, maximální odchylka úhlu α					
z_{ref}	0,003	m	s_{ref}	0,002	m
z_{lin}	0,002	m	s_{lin}	0,001333	m
z_{fl}	0,002	m	s_{fl}	0,001333	m
z_{α}	2	°	s_{α}	0,023259	rad

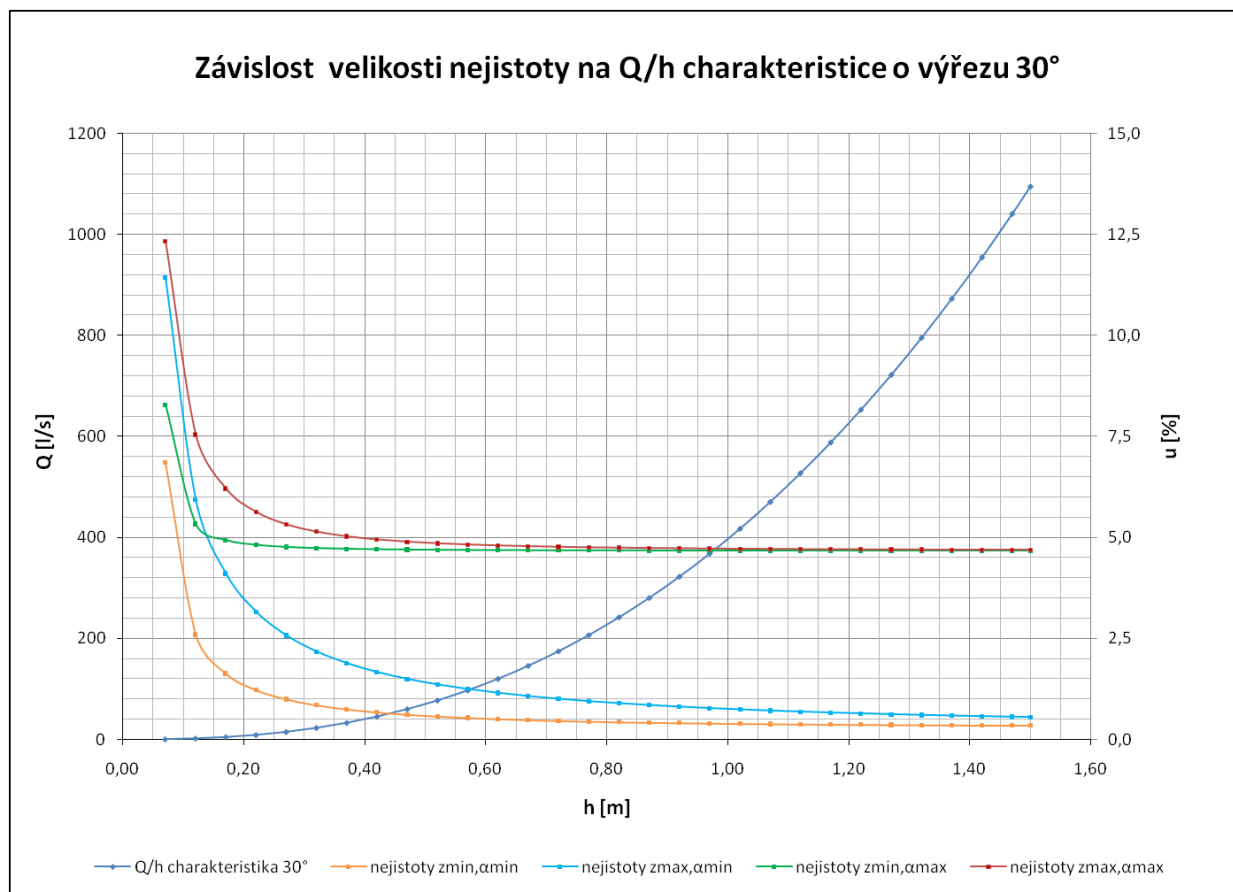
Tab. 40 Kombinace odchylek přepadové výšky s odchylkou úhlu α

Pro tyto kombinace odchylek jsme počítali celkové nejistoty měrných clon o výřezu 15°, 30° a 60° v rozmezí přepadové výšky od 0,07 m po 1,5 m. V případě zvolení svislé odlehlosti vrcholu výřezu ode dna potrubí musí uživatel počítat se zmenšením rozsahu přepadové výšky na přelivu. V grafu 29 jsou vyneseny celkové hodnoty nejistoty ke Q/h charakteristice měrné clony o výřezu 15°.



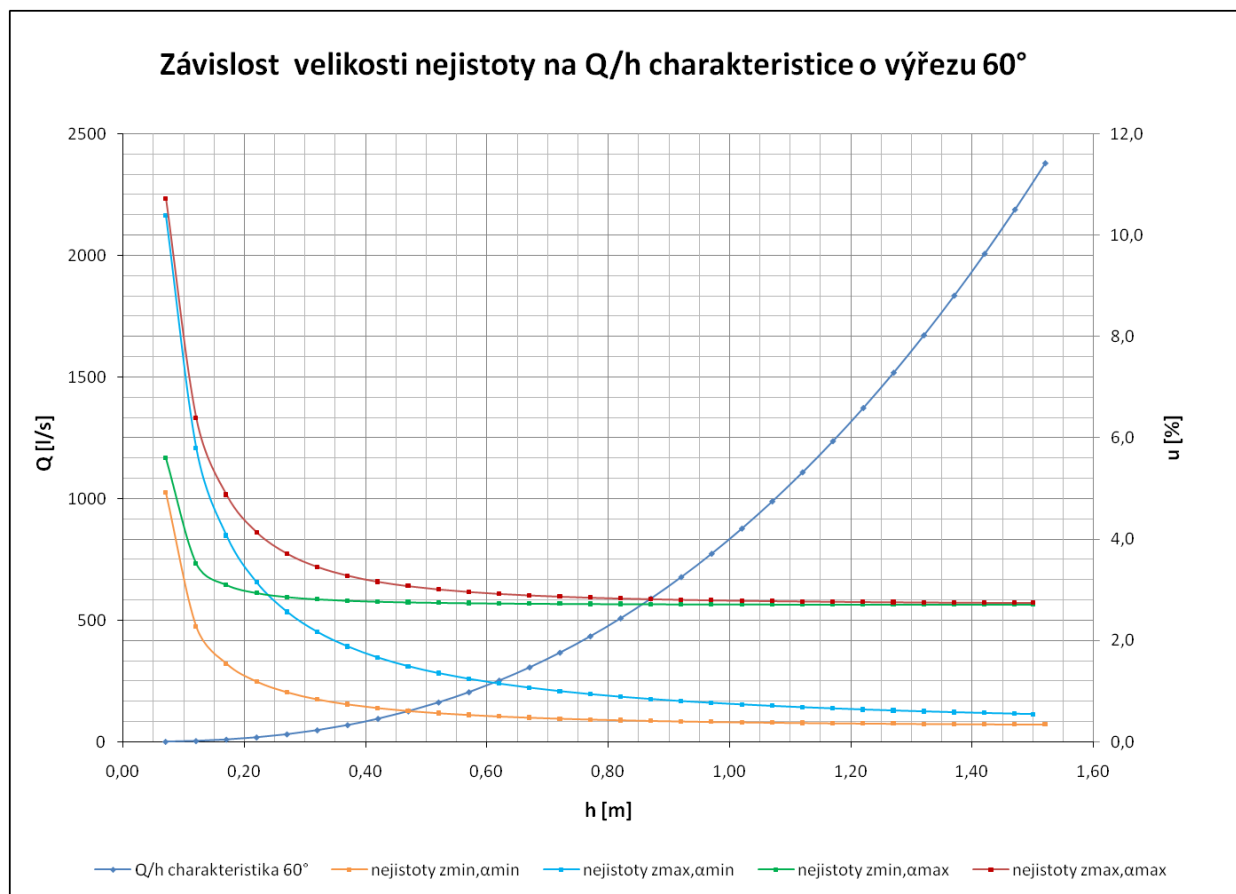
Je patrné, že vliv odchylky úhlu α má velký dopad na velikost nejistoty. V případě zvolení maximální odchylky úhlu α , výsledné hodnoty nad 20 l/s zatěžuje nejistota o velikosti 9%. V případě nižších průtoků nejistoty výpočtu vzrůstají, u maximálních hodnot odchylek je to až 14%. U variant s minimální odchylkou úhlu α jsou nejistoty výrazně nižší. V případě velikosti přepadové výšky $h > 0,3$ m se hodnoty nejistot vejdou do 2,5 %, v případě $h < 0,3$ m nejistota roste až na 11%.

V případě Q/h charakteristiky pro výřez o 30° je závislost nejistot na regresi uvedena v grafu 30. Maximální hodnoty nejistot jdou pod hranici 12,5 %. Opět nejistoty s maximální odchylkou úhlu α mají vyšší hodnoty nejistot. Jejich minimální hodnoty neklesnou pod 4,6%. V případě, kdy do výpočtu nevstupuje odchylka úhlu α , jsou hodnoty nejistot nižší a od přepadové hloubky 0,35 m jsou nejistoty menší jak 2,5%. Pokud $h < 0,3$ m nejvyšší možná nejistota má hodnotu 8%



Graf 30

V posledním grafu 31, vidíme závislost nejistot měření na Q/h charakteristice pro výřez o 60°. Maximální nejistota v grafu dosahuje při přepadové výšce 0,07 m 11%. V případě maximálních odchylek se nejistoty pohybují od přepadové výšky 0,35 m kolem 3%. U nejistot, kde nezasahuje odchylka úhlu α , se hodnoty pohybují při $h > 0,35$ m pod 2% a při $h < 0,35$ m strmě rostou až na hodnoty 10,5%.



Graf 31

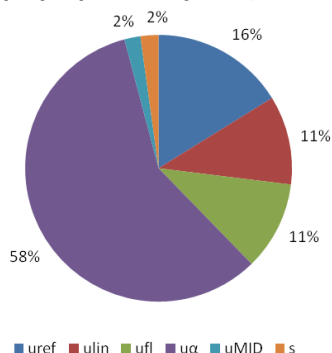
Jak už bylo řečeno v předešlém textu, při malých průtocích je hodnota nejistoty vysoká a s narůstajícím průtokem klesá. V případě malých průtoků má na celkovou nejistotu velký vliv stanovení odchylky přepadové výšky, tento vliv se ale s narůstajícím průtokem zmenšuje a relativně se zvětšuje vliv případné odchylky úhlu výřezu.

Pro představu jsme v následujícím textu porovnali jednotlivé vlivy podílející se na celkové nejistotě stanovení průtoku pro všechny tři typy měrných clon. Hodnoty nejistot jsou vypočítány pro všechny tři typy měrných clon dle tabulky 40 pro variantu s maximální odchylkou stanovení úhlu a maximální odchylkou měření přepadové výšky. V tabulce 41 jsou uvedeny tři reprezentativní přepadové výšky s vypočítaným průtokem a celkovou nejistotou pro měrnou clonu o výřezu 15°.

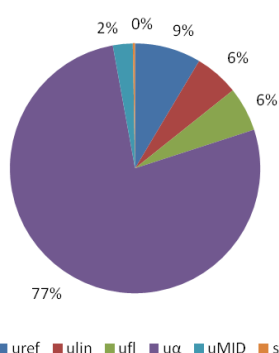
Vstupní hodnoty		Celková nejistota
h	Q_{15}^R	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[%]
0,200	0,00374	9,64
0,500	0,03698	9,10
1,200	0,32998	9,02

Tab. 41 Vynesení celkové nejistoty pro tři reprezentativní přepadové výšky

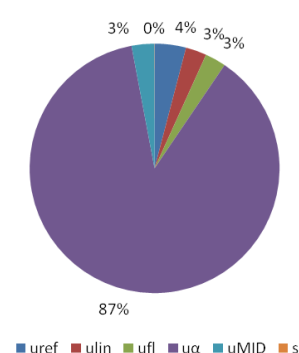
Poměr nejistot u výřezu o 15° při přepadové výšce 0,2 m



Poměr nejistot u výřezu o 15° při přepadové výšce 0,5 m



Poměr nejistot u výřezu o 15° při přepadové výšce 1,2 m



Graf 32

Pro názornost jsou v grafu 32 znázorněny tři koláčové grafy. Každý graf znázorňuje ovlivnění celkové nejistoty jednotlivými odchylkami. Při přepadové výšce 0,2 m byla vypočítána výsledná nejistota stanovení průtoku při průtoku 3,7 l/s 9,6 % z toho se 38 % podílela nejistota v měření přepadové výšky a 58 % nejistota ze stanovení úhlu α . V případě přepadové výšky 0,5 m za průtoku 37 l/s je výsledná nejistota nižší, tedy 9,1 % a vliv úhlu α se zvýšil na podíl 77% z celkové nejistoty. Nejistoty 9 % bylo dosaženo v případě přepadové výšky 1,2 m, kterou již z 87% ovlivňovala odchylka ze stanovení úhlu α .

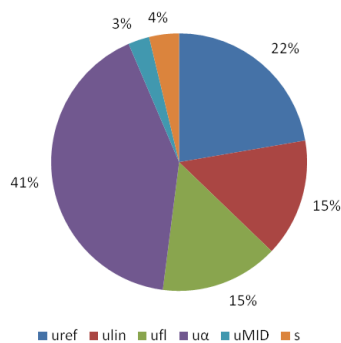
Pro měrnou clonu o výřezu 30° jsou v tabulce 42 uvedeny stejné hodnoty přepadové výšky jako v případě měrné clony o výřezu 15°. Průtok se díky závislosti 7.6 zvětšil a celkové relativní nejistoty se tak zmenšily.

Vstupní hodnoty		Celková nejistota
h	Q_{30}^R	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[%]
0,200	0,00710	5,81
0,500	0,07020	4,86
1,200	0,62639	4,70

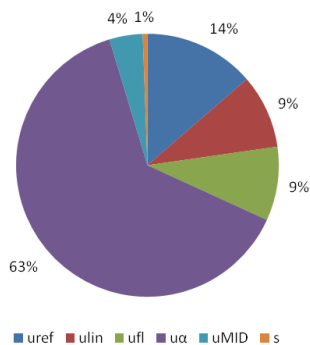
Tab. 42 Vynesení celkové nejistoty pro tři reprezentativní přepadové výšky

V grafu 33 jsou vyneseny koláčové grafy s podílem jednotlivých nejistot na celkové nejistotě. V tomto případě zvětšující se průtok má za následek snížení celkové nejistoty výpočtu a zároveň i potlačení vlivu úhlu α na celkové nejistotě. V případě situace, kdy přepadová výška je 0,2 m, se z 52% na celkové nejistotě podílí nejistoty ze stanovení přepadové výšky přelivu a 41 % ovlivňuje velikost úhlu. Zbylých 7 % se rozděluje mezi vliv odchylky stanovení regresní funkce a vliv nejistoty z měření průtoku magneticko-indukčním průtokoměrem.

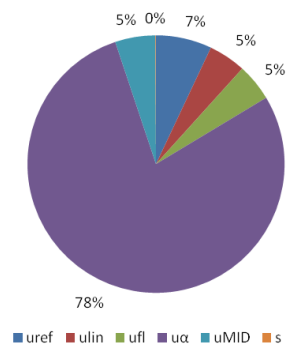
Poměr nejistot u výřezu o 30° při přepadové výšce 0,2 m



Poměr nejistot u výřezu 30° při přepadové výšce 0,5 m



Poměr nejistot u výřezu o 30° při přepadové výšce 1,2 m



Graf 33

V dalších dvou případech se vliv úhlu α opět zvyšuje, ale už nemá takový dopad na celkovou nejistotu jako v případě měrné clony o výřezu 15°.

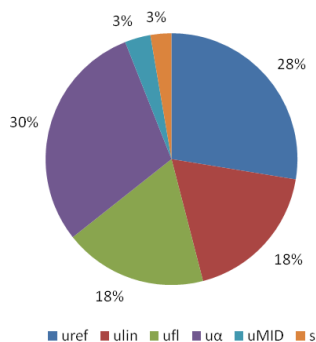
Poslední měrná clona o výřezu 60° vykazuje pro tři přepadové výšky tyto hodnoty průtoků a nejistot (tabulka 43).

Vstupní hodnoty		Celková nejistota
h	Q_{60}^R	u_Q
[m]	[m ³ /s]	[%]
0,200	0,01494	4,38
0,500	0,14760	3,03
1,200	1,31710	2,76

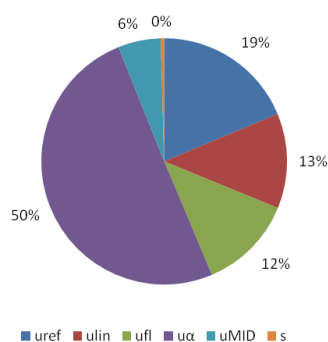
Tab. 43 Vynesení celkové nejistoty pro tři reprezentativní přepadové výšky

Lze si opět povšimnout, že se celková nejistota zmenšila. A podíl jednotlivých nejistot je znázorněn v grafu 34.

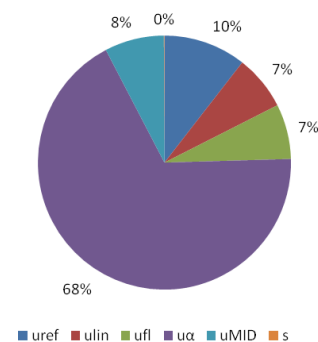
Poměr nejistot u výřezu o 60°
při přepadové výšce 0,2 m



Poměr nejistot u výřezu o 60°
při přepadové výšce 0,5 m



Poměr nejistot u výřezu o 60°
při přepadové výšce 1,2 m



Graf 34

Vliv úhlu na celkovou nejistotu se zmenšil, v případě přepadové výšky 0,2 m je pouze 30 %, zatímco vliv stanovení přepadové výšky se zvýšil na 64 %. V dalších dvou koláčových grafech procenta úhlu α na celkové nejistotě narůstají až na 68 %. U nejistot ze stanovení přepadové výšky je to sice obráceně, ale vliv u přepadové výšky 1,2 m je stále poměrně velký. Představuje 24 % z celkové nejistoty. Chyba odhadu stanovení regresní funkce je zanedbatelná a vliv magneticko-indukčního průtokoměru dělá 8 % celkové nejistoty.

Lze tedy konstatovat, že s narůstající přepadovou výškou a průtokem se nejistota v měření u všech typů měrných clon zmenšuje. V případě nízkých průtoků jsou hodnoty

nejistot vysoké, a proto se doporučuje volit citlivější měrnou clonu. V praxi proto musíme brát v úvahu rozsah průtoků, který měříme a dle něj vybrat takovou clonu, která by byla dostatečně citlivá a zároveň dokázala převést maximální průtok, tak jak bylo uvedeno v kapitole 12.

13 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce slouží pro návrh třech různých typů měrných clon s úhly výřezu 15°, 30° a 60° instalovatelných do kanalizačního potrubí.

Z výsledků provedeného hydraulického modelového výzkumu je současně možné stanovit Q/h charakteristiky i pro kruhové profily o větších průměrech a určit jejich nejistoty při užití konkrétní clony.

V úvodu práce je čtenář seznámen se základní teorií ostrohranných přelivů a tvary jejich Q/h charakteristik. Následuje popis laboratorního měření a zpracování výsledků pro jednotlivé měrné clony o různých svislých odlehlostech vrcholu výřezu ode dna. Z výsledků získaných v této práci jsme zjistili, že vliv svislé odlehlosti na výslednou Q/h charakteristiku je téměř zanedbatelný. Z tohoto důvodu došlo ke sloučení naměřených dat a získání jedné výsledné regrese pro každou měrnou clonu. Tyto regrese byly porovnány s ČSN a následně porovnány i mezi sebou. V dalších kapitolách jsou řešeny a prezentovány výpočty nejistot i v případě větších průměrů potrubí. V závěru práce jsou všechny předešlé výpočty a závislosti aplikovány v kapitole návrh měrné clony, která má pomoci při návrhu typu a tvaru měrné clony a velikosti nejistot na ní při použití in situ.

Díky grafům, které vyjadřují procentuální podíl jednotlivých odchylek na celkové nejistotě, můžeme zjistit, které odchylky mají největší vliv na nejistotu ve stanovení průtoku a dle těchto faktů se následně řídit při instalaci v in situ.

Dále jsou v několika grafech vyneseny celkové průběhy nejistot v rozsahu přepadové výšky od 0,07 m do 1,5 m při různých variantách odchylek pro všechny tři typy měrných clon.

Během vyhodnocování výsledků jsme dospěli ke zjištění, že vliv svislé odlehlosti výřezu ode dna je zanedbatelný na výslednou Q/h charakteristiku, otázkou zůstává, jaký vliv na výslednou Q/h charakteristiku by mělo zanesení protiproudě se nacházejícího prostoru před měrnou clonou splaveninami. Tato otázka může být brána jako téma pro další výzkumnou činnost.

14 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN ISO 1438-1. *Měření průtoku vody v otevřených korytech pomocí přelivů a Venturiho žlabů. Část 1: Tenkostěnné přelivy*, 1997
- [2] Jandora J., Šulc J. *Hydraulika*, AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM[®], s.r.o. Brno, 2007
- [3] Janics G., Parikrupa M. *Merné prípady tabuľky*, Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava, 1970
- [4] Smetana J. *Hydraulika 2.*, ČSAV Praha, 1957
- [5] Franke P. G. *Abfluß über Wehre und Überfälle*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1982
- [6] Urbánek T., Škárka J. *MS Excel 97 pro vědce a inženýry*, Computer Press Praha, 1998
- [7] http://www.krohne-downloadcenter.com/dlc/MA_AQUA_ECO_IFC010_cz_72.pdf
<http://www.pars-aqua.cz/clanek17.html>
- [8] Litschmannová M. *Úvod do statistiky*, VŠB – TU Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ostrava, 2011
- [9] Čábelka J., Novák P. *Hydrotechnický výzkum I*, Státní nakladatelství technické literatury, Praha, 1964
- [10] Žoužela M., Šulc J. *Měření průtoků a proteklého objemu vody v profilech s volnou hladinou – Technické, metrologické a provozní požadavky na pracovní měřidla a posuzování jejich funkční způsobilosti*, SOVAK ČR. Metodický návod, LVV-FAST-VUT v Brně, 2011

Seznam symbolů

Součinitel výtoku	μ	[-]
Dolní mez intervalového odhadu střední funkční hodnoty na 95% hladině spolehlivosti	$95\% IS^-$	[m ³ /s]
Horní mez intervalového odhadu střední funkční hodnoty na 95% hladině spolehlivosti	$95\% IS^+$	[m ³ /s]
Šířka přelivné hrany	b	[m]
Šířka přítokového koryta	B	[m]
Součinitel průtoku pro měrnou clonu s úhlem výřezu 15° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu 0, 30, 60, 100 mm	$C_{15-0,30,60,100}$	[-]
Součinitel průtoku pro měrnou clonu s úhlem výřezu 30° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu 0, 30, 60, 100 mm	$C_{30-0,30,60,100}$	[-]
Součinitel průtoku pro měrnou clonu o úhlem výřezu 60° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu 0, 30, 60, 100 mm	$C_{60-0,30,60,100}$	[-]
Součinitel průtoku dle ČSN EN ISO 1438-1 pro úhel výřezu 15°	$C_{ČSN15}$	[-]
Součinitel průtoku dle ČSN EN ISO 1438-1 pro úhel výřezu 30°	$C_{ČSN30}$	[-]
Součinitel průtoku dle ČSN EN ISO 1438-1 pro úhel výřezu 60°	$C_{ČSN60}$	[-]
Součinitel průtoku	C_e	[-]
Průměr potrubí na modelu	DN_{model}	[m]
Průměr potrubí na skutečném díle	DN_{SK}	[m]
Tíhové zrychlení ($g=9,81 \text{ m/s}^2$)	g	[m/s ²]
Přepadová výška	h	[m]
Geodetická výška	H	[m]
Svislá odlehlost dolní hrany otvoru pod hladinou	h_1	[m]
Přepadová výška pro měrnou clonu s úhlem výřezu 15° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$h_{15-0,30,60,100}$	[m]
Svislá odlehlost horní hrany otvoru pod hladinou	h_2	[m]
Přepadová výška pro měrnou clonu s úhlem výřezu 30° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$h_{30-0,30,60,100}$	[m]
Přepadová výška pro měrnou clonu s úhlem výřezu 60° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$h_{60-0,30,60,100}$	[m]
Efektivní přepadová výška	h_e	[m]
Experimentálně určená veličina	k_h	[m]
Součinitel přepadu	m	[-]
Součinitel přepadu pro ostrohranný obdélníkový přeliv	m_b	[-]
Měřítka délek	M_l	[-]
Vnitřní průměr potrubí	\varnothing	[m]
Svislá odlehlost vrcholu výřezu nade dnem přítokového koryta	p	[m]
Počet stupňů volnosti	P	[-]
Svislá odlehlost vrcholu výřezu nade dnem na modelu	p_{model}	[m]

Svislá odlehlost vrcholu výřezu nade dnem ve skutečnosti	p_{SK}	[m]
Průtok	Q	[m ³ /s]
Průtok pro měrnou clonu s úhlem výřezu 15° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$Q_{15-0,30,60,100}$	[m ³ /s]
Průtok pro měrnou clonu s úhlem výřezu 30° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$Q_{30-0,30,60,100}$	[m ³ /s]
Průtok pro měrnou clonu s úhlem výřezu 60° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$Q_{60-0,30,60,100}$	[m ³ /s]
Průtok dle ČSN EN ISO 1438-1 pro úhel výřezu 15°	$Q_{ČSN15}$	[m ³ /s]
Průtok dle ČSN EN ISO 1438-1 pro úhel výřezu 30°	$Q_{ČSN30}$	[m ³ /s]
Průtok dle ČSN EN ISO 1438-1 pro úhel výřezu 60°	$Q_{ČSN60}$	[m ³ /s]
Průtok	Q_i	[m ³ /s]
Regresní odhad průtoku	Q_i^r	[m ³ /s]
Průtok na modelu	Q_{model}	[m ³ /s]
Regresní odhad průtoku pro měrný přeliv s úhlem výřezu 15°	Q_{15}^R	[m ³ /s]
Regresní odhad průtoku pro měrnou clonu s úhlem výřezu 15° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$Q_{15-0,30,60,100}^R$	[m ³ /s]
Regresní odhad průtoku pro měrný přeliv s úhlem výřezu 30°	Q_{30}^R	[m ³ /s]
Regresní odhad průtoku pro měrnou clonu s úhlem výřezu 30° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$Q_{30-0,30,60,100}^R$	[m ³ /s]
Regresní odhad průtoku pro měrný přeliv s úhlem výřezu 60°	Q_{60}^R	[m ³ /s]
Regresní odhad průtoku pro měrnou clonu s úhlem výřezu 60° se svislou odlehlostí vrcholu výřezu (0, 30, 60, 100) mm	$Q_{60-0,30,60,100}^R$	[m ³ /s]
Průtok po přepočtu na dílo	Q_{SK}	[m ³ /s]
Reziduum výsledné regrese s dolní mezí intervalového odhadu střední funkční hodnoty	$rez\ IS^-$	[m ³ /s]
Reziduum výsledné regrese s horní mezí intervalového odhadu střední funkční hodnoty	$rez\ IS^+$	[m ³ /s]
Plocha průtočného průřezu ve výřezu přelivu	S	[m ²]
Bodový odhad směrodatné odchylky od Q/h	s	[m ³ /s]
Plocha průtočného průřezu přívodního koryta	S_0	[m ²]
Suma součtu reziduí	s_0	[m ³ /s]
Směrodatná odchylka od časově vyhlazené úrovně hladiny při ustáleném průtoku	S_{fl}	[m ³ /s]
Směrodatná odchylka přesnosti měřidla výšky	S_{lin}	[m ³ /s]
Směrodatná odchylka nastavení referenční úrovně	S_{ref}	[m ³ /s]
Chyba odhadu regresní funkce	S_{reg}	[m ³ /s]
Směrodatná odchylka parametru X_i	S_{xi}	[m ³ /s]
Směrodatná odchylka úhlu výřezu	S_α	[m ³ /s]

Počet naměřených hodnot	u	[-]
Nejistota typu B funkce Y	u_{BY}	[m ³ /s]
Nejistota v měření průtoku magneticko-indukčním průtokoměrem	u_{MID}	[m ³ /s]
Celková nejistota stanovení průtoku	u_Q	[m ³ /s]
Nejistota ve stanovení průtoku hydraulickým okruhem laboratoře	u_{QB}	[m ³ /s]
Přítoková rychlost	v_0	[m/s]
Šířka přelivu v úrovni H - h	y	[m]
Odchylka od časově vyhlazené úrovně hladiny při ustáleném průtoku	z_{fl}	[m]
Odchylka přesnosti měřidla výšky	z_{lin}	[m]
Odchylka nastavení referenční úrovně měřidla	z_{ref}	[m]
Odchylka úhlu výřezu	z_α	[°]
Úhel výřezu	α	[°]
Relativní procentuální odchylka	δ	[%]